

دليل المهندس المدني

• الصيغ الهندسية والجداول والمخططات البيانية من أجل حلول سريعة ودقيقة في متناول يدك



إعداد المهندس المدني
محمد صوراني


منتدى إقراء الثقافي

- الطبعة الأولى 2003

- الناشر: **شعاع للنشر والعلوم**

المحافظة - شارع القاهرة

هاتف : 2643546 (21) 00963

تلفاكس : 2643545 (21) 00963

ص.ب 7875

سورية ـ حلب

لمزيد من المعلومات

يرجى زيارة موقعنا على الانترنت: http://www.raypub.com

البريد الإلكتروني للقراء: info@raypub.com

البريد الإلكتروني لدور النشر والموزعين: raymail@raypub.com

دليل
المهندس المدني

إعداد المهندس محمد صوراني

اللّٰهُمَّ انْفَعْنِي بِمَا عَلَّمْتَنِي، وَعَلِّمْنِي ما يَنْفَعُنِي،
وَزِدْنِي عِلْماً، وَالْحَمْدُ لِلّٰهِ عَلَى كُلِّ حالٍ

حديث شريف

مقدمة

يقدم الكتاب المساعد هذا أكثر من ألفي صيغة يحتاجها المهندسون المدنيون فتساعدهم في تصاميمهم المكتبية والحقلية وفي العديد من الميادين المتعلقة بمهام التشييد والبناء، وذلك في أي بقعة من العالم. كما تقدم تلك الصيغ يد العون لرسامي التصاميم ومهندسي الإنشاءات ومهندسي الجسور وبنائي الأساسات وللمهندسين الحقليين وللمهندسين المرشحين لفحص مزاولة المهنة وللمتخصصين في مادة البيتون ولبنّائي المنشآت الخشبية* وللطلاب الذين يتابعون دراستهم في كافة فروع الهندسة المدنية.

يعرض الكتاب الصيغ التي يحتاجها المهندسون المدنيون في اثني عشر فصلاً مختلفاً يتخصص كل واحد منها بفرع من فروع الهندسة المدنية مثل: الجيزان والجيزان الرئيسية، الأعمدة، الأوتاد وعموم أنواع الركائز، المنشآت البيتونية، هندسة المنشآت الخشبية، الهندسة المساحية، الدراسات المتعلقة بالتربة والأعمال الترابية، هندسة إنشاء المباني، الجسور، أكبال التعليق، هندسة الطرق والطرق العامة ذات الاتجاهين (السريعة)، ميكانيك الموائع والجريانات في الأقنية المكشوفة. وقد تمّ سرد صيغ مفاتيح الحل المتعلقة بكل موضوع من هذه المواضيع المعروضة. لقد تمّ شرح كل صيغة من تلك الصيغ بحيث يعرف المهندس أو الرسام أو المصمم كيف وأين ومتى عليه أن يستخدم الصيغة المطلوبة أثناء مزاولة عمله.

أُعطيت الواحدات المستخدمة في الصيغ في كلٍ من النظامين؛ USCS (النظام المتّبع في الولايات المتحدة – United States Customary System) وSI (النظام الدولي – System International). مما يعني أن الكتاب قابل للاستخدام في أي بقعة من العالم. وللأخذ بيد المهندس المدني أكثر في استخدام مادة هذا الكتاب من أجل مزاولة

---

* بناء المنازل الخشبية في الولايات المتحدة ظاهرة منتشرة، لذلك يوجد تخصص يعرف بالمنشآت الخشبية. المعدّ.

مهنة الهندسة في شتى أنحاء العالم على نحو يسير وسهل، تمّ عرض جدوَلة شاملة لعوامل التحويل في الفصل الأول من الكتاب.

مفيدٌ أن نعرف أنّ عملية جمع ولملمة مثل هذه الكمية الكبيرة من الصيغ، تتطلب من المؤلف أن يكون مُقاداً من قبل خبراء متخصصين يذكّرون بالميادين الأكثر احتياجاً وأهمية سردها في الكتب المساعدة التي تضم الصيغ العملية والتطبيقية في الهندسة المدنية.

تضمّنت المصادر التي استندت عليها الصيغ المقدمة في هذا الكتاب تجمّعات إدارية وصناعية متنوعة لها باع مديد في حقل الهندسة المدنية، فكان منها مؤلفو الكتب المرجعية حول المواضيع الهامة والرسامون والباحثون في حقل الهندسة المدنية، وكان منها أيضاً مهندسو التصميم الذين يعملون يومياً في حقل الهندسة المدنية. وقد تم سرد هذه المصادر في سياق كلمة الشكر.

يُنصح الدارس عند استخدام أي صيغة من الصيغ الواردة في هذا الكتاب والتي ربما جاءت من كود صناعي أو إداري، أن يعود إلى أحدث إصدار للكود. فالصيغ قد تتبدّل من إصدار لآخر للكود. لذا يجب ألا يغيب عن أذهاننا أنّ عملاً بهذا الحجم يصعُب فيه تضمين الصيغ الصادرة حديثاً من كودات تتغير على نحو دائم.

احتمال حدوث أخطاء ضمن عمل بهذا الحجم وارد، لذا فالمؤلف سيمتنُّ كثيراً لأي قارئ يتمحّص الكتاب ويكتشف خطأً فيه فيلفت انتباه المؤلف إليه. كل ما عليه أن يفعله هو أن يكتب للمؤلف فقط، وذلك بإشراف الناشر. وسيتم تصحيح الخطأ في الطبعة التالية.

إضافة لما ذكر، إذا كان القارئ يعتقد أن صيغة واحدة أو أكثر قد أُهملت و لم يكن الكتاب بغني عنها، فالمؤلف سيكون مسروراً لأخذها بعين الاعتبار وإدخالها في الطبعة التالية من الكتاب. مرة أخرى نقول للقارئ أن ما عليه إلا أن يكاتب المؤلف تحت عناية الناشر.

كيف تستخدم هذا الكتاب

الصيغ التي تمّ تقديمها في هذا الكتاب معنّي باستخدامها المهندسون المدنيون في كل وجهة من وجهات عملهم المهني؛ في التصميم والتقييم والإنشاء والتحضير، .... لكي تجد الصيغة الملائمة للحالة التي تواجهها، ابدأ باستشارة الدليل. فقد بُذل جهدٌ كبيرٌ لتقديم لائحة شاملة عن جميع الصيغ الموجودة في الكتاب.

فور أن تجد الصيغة التي تبحث عنها، اقرأ النص المرافق الذي يعطي معلومات خلفية عن الصيغة. وبعد أن تستوعب الصيغة ومجالات تطبيقاتها، قم بإدخال القيم العددية عوضاً عن المتحولات الموجودة في الصيغة. بعد ذلك قم بحل الصيغة واستخدم النتائج في المهمة التي بين يديك.

باعتبار أن الصيغة قد تكون آتية من كود إداري رسمي (صادر عن جهة رسمية) أو من كود كائن ومعد لأعمال خاصة قيد الإنجاز، تأكد من فحص الإصدار الأخير للكود المعد للتطبيق لترى إذا كانت الصيغة المعطاة تتوافق مع صيغة الكود. فإن لم تتفق معه، تأكد من أنك تستخدم الصيغة الصادرة من أحدث كود متاح لك. وتذكر دائماً أنك كمهندس مصمم، مسؤول عن المنشآت التي تقوم بتخطيطها وتصميمها وبنائها. إن استخدام الإصدار الأخير لأي كود حكومي (صادر عن جهات رسمية) هو الطريقة الفعّالة الوحيدة للوصول إلى تصميم آمن يتمتع بثقة الجميع، فيدخل إلى نفسك الطمأنينة لأن تكون على صلة وثيقة به. هذا عدا عن أنك ستنام وأنت مرتاح وآمن تماماً.

1

عوامل التحويل الخاصة بتطبيقات الهندسة المدنية

Conversion Factors for Civil Engineering Practice

يقبل المهندسون المدنيون في أي مكان من العالم كلاً من نظام الولايات المتحدة المتبع (USCS) والنظام الدولي (SI) لواحدات القياس وذلك من أجل الحسابات التطبيقية والنظرية. وعلى أي حال، يبقى نظام الواحدات الدولي (SI) الأكثر استخداماً من النظام الخاص بالولايات المتحدة (USCS). لذا فقد تم بشكل أساسي إدراج النظامين USCS وSI من أجل كل صيغة في هذا الكتاب.

إذن، فمستخدم هذا الكتاب يستطيع تطبيق الصيغ بيسر وسهولة في أي مكان من العالم.

وللسماح باستخدام أوسع لهذا الكتاب، تضمن هذا الفصل عوامل التحويل المطلوبة للانتقال من أحد الأنظمة إلى نظام آخر. أما بالنسبة للمهندسين اللامتآلفين مع أي نظام بديل آخر للواحدات، فإن المؤلف يقترح عليهم اتباع الخطوات التالية ليصيروا متآلفين مع الأنظمة التي لا يعرفونها:

1. قم بإعداد قائمة القياسات التي تستخدمها على نحوٍ شائع في عملك اليومي.

2. أدخل وقابل كل واحدة لا تعرفها مع الواحدة من النظام الآخر. يبين الجدول 1.1 مثل هذه اللائحة لنظام الواحدات USCS مع نظام الواحدات SI المقابل لها كما يبين الرموز المعدة من قبل مهندس مدني يستخدم بشكل اعتيادي النظام USCS. نظام الواحدات SI الموضح في الجدول 1.1 تم الحصول عليه من الجدول 1.3 من قبل المهندس.

3. قم بإيجاد القيمة التي تريد استخدامها، من جدول لعوامل التحويل كالجدول 1.3 مثلاً، لتحويلها من النظام USCS إلى النظام SI. أدخل كل قيمة ملائمة مأخوذة من الجدول 1.3، في الجدول 1.2.

4. قم بتطبيق قيم التحويل حيث يكون ضرورياً بما يخص الصيغ الموجودة في هذا الكتاب.

5. تذكر – في الوقت الحاضر – أن حُلَّ وجه الصعوبة التي تعانيها لتصبح متآلفاً مع النظام الجديد للقياسات، ستغدو فيما بعد سهلة ومريحة لك باستخدامك

أسماء وقيم الواحدات. وعندما تقوم بإعداد جدول التحويل الخاص بك، سيكون التحويل العددي بسيطاً وسهلاً.

الجدول 1.1 الواحدات المستخدمة على نحو شائع، USCS وSI

الواحدة المستخدمة في النظام USCS	الواحدة المستخدمة في النظام SI	رمز الواحدة في النظام SI	عامل التحويل (أضرب الواحدة المستخدمة في النظام USCS بهذا العامل لتحصل على الواحدة في النظام SI)
square foot	square meter	m^2	0.0929
cubic foot	cubic meter	m^3	0.2831
pound per square inch	kilopascal	kPa	6.894
pound force	newton	Nu	4.448
foot pound torque	newton meter	N.m	1.356
kip foot	kilonewton meter	kN.m	1.355
gallon per minute	liter per second	L/s	0.06309
kip per square inch	megapascal	MPa	6.89

هذا الجدول مختصر، أما من أجل التطبيقات الهندسية النموذجية فالجدول الفعلي سيفوق هذا الجدول عدداً من المرات.

كن حذراً، عند استخدامك الصيغ التي تتضمن ثابتاً عددياً، في تحويل الثابت إلى ذلك الثابت في النظام الذي تستخدمه. وعلى أي حال، لك أن تستخدم الصيغة في نظام الواحدات USCS (عندما تكون الصيغة معطاة ضمن نظام هذه الواحدات) ثم تحوّل النتيجة النهائية إلى ما يكافئها في النظام SI مستخدماً الجدول 1.3.

كما لابد لك أن تقوم بعملية التحويل العكسي لبضعة صيغ معطاة في نظام الواحدات SI.

الجدول 1.2 جدول تحويل نموذجي†

مضروباً بـــ††	إلى	التحوّل من
9.290304 E - 02	square meter	square foot
	meter per second	foot per second
3.048 E - 01	squared	squared
2.831685 E - 02	cubic meter	cubic foot
	kilogram per cubic	pound per cubic
2.767990 E + 04	meter	inch
6.309 E - 02	liter per second	gallon per minute
		pound per square
6.894757	kilopascal	inch
4.448222	newton	pound force
4.788026 E + 0.4	pascal	kip per square foot
E - 02	cubic meter per	acre foot per day
1.427641	second	
4.046873 E + 03	square meter	acre
	cubic meter per	cubic foot per
2.831685 E - 02	second	second

† يتضمن هذا الجدول قيماً منتقاة محدودة. راجع تقرير المعلومات المتري الخاص بالدوائر الأميركية أو المكتب الدولي للمقاييس النظامية، النظام الدولي للواحدات (SI)، يمكن الحصول عليهما من مكتب الطباعة العائد للحكومة الأميركية (GPO)، وذلك للاطلاع على لوائح شاملة إلى أبعد الحدود لعوامل التحويل.

†† كما هو الحال في كتابة الرموز العلمية، تبيّن E أُسّاً متبوعاً بعدد موجب أو سالب يمثل القوة للعدد 10 التي يجب أن يضرب بها عامل التحويل قبل استخدامه. إذن من أجل عوامل تحويل القدم المربع نكتب: $9.290304 \times 10^{-2} = 0.09290304$ وهو العامل الذي يجب استخدامه لتحويل القدم المربع إلى الأمتار المربعة. وبالنسبة للأس الموجب، كما في حالة تحويل الإيكرات (الإيكر ـــ acre وحدة قياس للمساحة تستخدم في إنكلترا والولايات المتحدة) إلى الأمتار المربعة، يضرب بـــ: $4.046873 \times 10^3 = 4046.8$. عندما لا يتم العثور على عامل التحويل، يستخدم ببساطة ما يسمى الاستبدال البعدي. إذن، لتحويل الباوند بالإنش المكعب إلى الكيلو غرام بالمتر المكعب، نجد أن: 1 Lb = 0.453 5924 Kg و $1\ in^3 = 0.00001638706\ m^3$. بالتالي يكون:

$$1\ Lb/in^3 = 0.4535924\ Kg/0.00001638706\ m^3 = 27.680.01 \text{ or } 2.768\ E + 4^{*}.$$

* تستخدم الفارزة أو الفاصلة (,) بين الأرقام لتبين خانة الآلاف مثل 10,000 عشرة آلاف و100,000 مئة ألف و2,000,000 مليونان. أما النقطة (.) فتوضع بين الأرقام لتبين الكسور العشرية، مثلاً نقرأ العدد 2.7 بـــ اثنان فاصلة سبعة بالعشرة. (المعدّ)

الجدول 1.3 عوامل التحويل إلى نظام الواحدات الدولي للقياسات (SI Units of Measurement)

التحوّل من	إلى	مضروباً بـ
acre foot.acre ft	cubic meter.m^3	1.23489 E + 03
acre	square meter.m^2	4.046873 E + 03
angstrom,	meter, m	1.000000* E - 10
atmosphere, atm (standard)	pascal, Pa	1.013250* E + 05
atmosphere, atm (technical = 1 kgf/cm^2)	pascal, Pa	9.806650* E + 04
bar	pascal, Pa	1.000000* E + 05
barrel (for petroleum, 42 gal)	cubic meter, m^3	1.589873 E - 01
board foot, board ft	cubic meter, m^3	2.359737 E - 03
British thermal unit, Btu, (mean)	joule, J	1.05587 E + 03
British thermal unit, Btu (International Table).in/(h)(ft^2) (°F) (k, thermal conductivity)	watt per meter kelvin, W/(m.K)	1.442279 E - 01
British thermal unit, Btu (International Table)/h	watt, W	2.930711 E - 01
British thermal unit, Btu (International Table)/(h) (ft^2) (°F) (C, thermal conductance)	watt per square meter kelvin, W/(m^2.K)	5.678263 E + 00
British thermal unit, Btu (International Table)/lb	joule per kilogram, J/kg	2.326000* E + 03
British thermal unit, Btu (International Table)/(lb) (°F) (c, heat capacity)	joule per kilogram Kelvin, J/(kg.K)	4.186800* E + 03
British thermal unit, cubic foot, Btu (International Table)/ft^3	joule per cubic meter, J/m^3	3.725895 E + 04
bushel (U.S.)	cubic meter, m^3	3.523907 E - 02
calorie (mean)	joule, J	4.19002 E + 00

الجدول 1.3 عوامل التحويل إلى نظام الواحدات الدولي للقياسات (SI Units of Measurement)
/تابع/

مضروباً بـ	إلى	التحوّل من
1.550003 E + 03	candela per square meter, cd/m^2	candela per square inch, cd/in^2
1.33322 E + 03	pascal, Pa	centimeter, cm, of mercury (0 °C)
9.80638 E + 01	pascal, Pa	centimeter, cm, of water (4 °C)
2.011684 E + 01	meter, m	chain
5.067075 E - 10	square meter, m^2	circular mil
8.640000* E + 04	second, s	day
8.616409 E + 04	second, s	day (sidereal)
1.745329 E - 02	radian, rad	degree (angle)
$T_K = t_C + 273.15$	Kelvin, K	degree Celsius
t_C $(t_F - 32)/1.8$	degree Celsius, °C	degree Fahrenheit
T_K $(t_F + 459.67)/1.8$	Kelvin, K	degree Fahrenheit
$T_K = T_R/1.8$	Kelvin, K	degree Rankine
1.761102 E - 01	Kelvin square meter per watt, $K.m^2/W$	(°F) (h) (ft^2)/Btu (International Table) (R, thermal resistance)
6.933471 E + 00	kelvin meter per watt, K.m/W	(°F)(h)(ft^2)/(Btu (International Table).in) (thermal resistivity)
1.000000* E - 05	Newton, N	dyne, dyn
1.828804 E + 00	meter, m	fathom
3.048000* E - 01	meter, m	foot, ft
3.048006 E - 01	meter, m	foot, ft (U.S. survey)
2.98898 E + 03	pascal, Pa	foot, ft, of water (39.2 °F) (pressure)
9.290304* E - 02	square meter, m^2	square foot, ft^2

الجدول 1.3 عوامل التحويل إلى نظام الواحدات الدولي للقياسات (SI Units of Measurement)
/تابع/

مضروباً بـــ	إلى	التحوّل من
2.580640* E - 05	square meter per second, m^2/s	square foot per hour, ft^2/h (thermal diffusivity)
9.290304* E - 02	square meter per second, m^2/s	square foot per second, ft^2/s
2.831685 E - 02	cubic meter, m^3	cubic foot, ft^3 (volume or section modulus)
4.719474 E - 04	cubic meter per second, m^3/s	cubic foot per minute, ft^3/min
2.831685 E - 02	cubic meter per second, m^3/s	cubic foot per second, ft^3/s
8.630975 E - 03	meter to the fourth power, m^4	foot to the fourth power, ft^4 (area moment of inertia)
5.080000* E - 03	meter per second, m/s	foot per minute, ft/min
3.048000* E - 01	meter per second, m/s	foot per second, ft/s
3.048000* E - 01	meter per second squared, m/s^2	foot per second squared, ft/s^2
1.076391 E + 01	lux, lx	footcandle, fc
3.426259 E + 00	candela per square meter, cd/m^2	footlambert, fL
1.355818 E + 00	joule, J	foot pound force, ft.lbf
2.259697 E - 02	watt, W	foot pound force per minute, ft.lbf/min
1.355818 E + 00	watt, W	foot pound force per second, ft.lbf/s
4.214011 E - 02	joule, J	foot poundal, ft poundal

الجدول 1.3 عوامل التحويل إلى نظام الواحدات الدولي للقياسات (SI Units of Measurement)
/تابع/

مضروبا بـ	إلى	التحوّل من
9.806650* E + 00	meter per second squared, m/s^2	free fall, standard g
4.546090 E - 03	cubic meter, m^3	gallon, gal (Canadian liquid)
4.546092 E - 03	cubic meter, m^3	gallon, gal (U.K. liquid)
4.404884 E - 03	cubic meter, m^3	gallon, gal (U.S. dry)
3.785412 E - 03	cubic meter, m^3	gallon, gal (U.S. liquid)
4.381264 E - 08	cubic meter per second, m^3/s	gallon, gal (U.S. liquid) per day
6.309020 E - 05	cubic meter per second, m^3/s	gallon, gal (U.S. liquid) per minute
9.000000* E - 01	degree (angular)	grad
1.570796 E - 02	radian, rad	grad
6.479891* E - 05	kilogram, kg	grain, gr
1.000000* E - 03	kilogram, kg	gram, g
1.000000* E + 04	square meter, m^2	hectare, ha
7.456999 E + 02	watt, W	horsepower, hp (550 ft.lbf/s)
9.80950 E + 03	watt, W	horsepower, hp (boiler)
7.460000* E + 02	watt, W	horsepower, hp (electric)
7.46043* E + 02	watt, W	horsepower, hp (water)
7.4570 E + 02	watt, W	horsepower, hp (U.K.)
3.600000* E + 03	second, s	hour, h
3.590170 E + 03	second, s	hour, h (sidereal)
2.540000* E - 02	meter, m	inch, in

الجدول 1.3 عوامل التحويل إلى نظام الواحدات الدولي للقياسات (SI Units of Measurement) /تابع/

مضروباً بـ	إلى	التحوّل من
3.38638 E + 03	pascal, Pa	inch of mercury, in Hg (32 °F) (pressure)
3.37685 E + 03	pascal, Pa	inch of mercury, in Hg (60 °F) (pressure)
2.4884 E + 02	pascal, Pa	inch of water, in H_2O (60 °F) (pressure)
6.451600* E - 04	square meter, m^2	square inch, in^2
1.638706 E - 05	cubic meter, m^3	cubic inch, in^3 (volume or section modulus)
4.162314 E - 07	meter to the fourth power, m^4	inch to the fourth power, in^4 (area moment of inertia)
2.540000* E - 02	meter per second, m/s	inch per second, in/s
$t_C = T_K - 273.15$	degree Celsius, °C	kelvin, K
9.806650* E + 00	newton, N	kilogram force, kgf
9.806650* E + 00	newton meter, N-m	kilogram force meter, kg.m
9.806650* E + 00	kilogram, kg	kilogram force second squared per meter, $kgf.s^2/m$ (mass)
9.806650* E + 04	pascal, Pa	kilogram force per square centimeter, kgf/cm^2
9.806650* E + 00	pascal, Pa	kilogram force per square meter, kgf/m^2
9.806650* E + 06	pascal, Pa	kilogram force per square millimeter, kgf/mm^2
2.777778 E - 01	meter pr second, m/s	kilometer per hour, km/h
3.600000* E + 06	joule, J	kilowatt hour, kWh
4.448222 E + 03	newton, N	kip (1000 lbf)

الجدول 1.3 عوامل التحويل إلى نظام الواحدات الدولي للقياسات (SI Units of Measurement) /تابع/

مضروباً بـ	إلى	التحوّل من
6.894757 E + 06	pascal, Pa	kip per square inch, kip/in^2 ksi
5.144444 E - 01	meter per second, m/s	knot, kn (international)
3.183099 E + 03	candela per square meter, cd/m^2	lambert, L
1.000000* E - 03	cubic meter, m^3	liter
1.000000* E - 08	weber, Wb	Maxwell
1.000000* E + 00	siemens, S	mho
2.540000* E - 08	meter, m	microinch, μin
1.000000* E - 06	meter, m	micron, μm
2.540000* E - 05	meter, m	mil, mi
1.609344* E + 03	meter, m	mile, mi (international)
1.609347 E + 03	meter, m	mile, mi (U.S. statute)
1.852000* E + 03	meter, m	mile, mi (international nautical)
1.852000* E + 03	meter, m	mile, mi (U.S. nautical)
2.589988 E + 06	square meter, m^2	square mile mi^2 (international)
2.589998 E + 06	square metr, m^2	square mile, mi^2 (U.S. statute)
4.470400* E - 01	meter per second, m/s	mile per hour, mi/h (international)
1.609344* E + 00	kilometer per hour, km/h	mile per hour, mi/h (international)
1.000000* E + 02	pascal, Pa	millibar, mbar
1.33322 E + 02	pascal, Pa	millimeter of mercury, mmHg (0 °C)
2.908882 E - 04	radian, rad	minute (angle)
6.000000* E + 01	second, s	minute, min
5.983617 E + 01	second, s	minute (sidereal)

الجدول 1.3 عوامل التحويل إلى نظام الواحدات الدولي للقياسات (SI Units of Measurement)
/تابع/

التحوّل من	إلى	مضروباً بـ
ounce, oz (avoirdupois)	kilogram, kg	2.834952 E - 02
ounce, oz (troy or apothecary)	kilogram, kg	3.110348 E - 02
ounce, oz (U.K. fluid)	cubic meter, m^3	2.841307 E - 05
ounce, oz (U.S. fluid)	cubic meter, m^3	2.957353 E - 05
ounce force, ozf	newton, N	2.780139 E - 01
ounce force.inch, ozf.in	newton meter, N-m	7.061552 E - 03
ounce per square foot, oz (avoirdupois)/ft^2	kilogram per square meter, kg/m^2	3.051517 E - 01
ounce per square yard, oz (avoirdupois)/yd^2	kilogram per square meter, kg/m^2	3.390575 E - 02
perm (0 °C)	kilogram per pascal second meter, kg/(Pa.s.m)	5.72135 E - 11
perm (0 °C)	kilogram per pascal second meter, kg/(Pa.s.m)	5.74525 E - 11
perm inch, perm.in (0 °C)	kilogram per pascal second meter, kg/(Pa.s.m)	1.45322 E - 12
perm inch, perm.in (23 °C)	kilogram per pascal second meter, kg/(Pa.s.m)	1.45929 E - 12
pint, pt (U.S. dry)	cubic meter, m^3	5.506105 E - 04
pint, pt (U.S. liquid)	cubic meter, m^3	4.731765 E - 04
poise, p (absolute viscosity)	pascal second, Pa*s	1.000000* E - 01
pound, lb (avoirdupois)	kilogram, kg	4.535924 E - 01

الجدول 1.3 عوامل التحويل إلى نظام الواحدات الدولي للقياسات (SI Units of Measurement) /تابع/

مضروبا بـ	إلى	التحوّل من
3.732417 E - 01	kilogram, kg	pound, lb (troy or apothecary)
2.926397 E - 04	kilogram square meter, $kg.m^2$	pound square inch, $lb.in^2$ (moment of inertia)
1.488164 E + 00	pascal second, Pa s	pound per foot second, lb/ft s
4.882428 E + 00	kilogram per square meter, kg/m^2	pound per square foot, lb/ft^2
1.601846 E - 01	kilogram per cubic meter, kg/m^3	pound per cubic foot, lb/ft^3
9.977633 E + 01	kilogram per cubic meter, kg/m^3	pound per gallon, lb/gal (U.K. liquid)
1.198264 E + 02	kilogram per cubic meter, kg/m^3	pound per gallon, lb/gal (U.S. liquid)
1.259979 E - 04	kilogram per second, kg/s	pound per hour, lb/h
2.767990 E + 04	kilogram per cubic meter, kg/m^3	pound per cubic inch, lb/in^3
7.559873 E - 03	kilogram per second, kg/s	pound per minute, lb/min
4.535924 E - 01	kilogram per second, kg/s	pound per second, lb/s
5.932764 E - 01	kilogram per cubic meter, kg/m^3	pound per cubic yard, lb/yd^3
1.382550 E - 01	newton, N	poundal
4.448222 E + 00	newton, N	pund-force, lbf
1.355818 E + 00	newton meter, N.m	pound force foot, lbf.ft
1.459390 E + 01	newton per meter, N/m	pound force per foot, lbf/ft

الجدول 1.3 عوامل التحويل إلى نظام الواحدات الدولي للقياسات (SI Units of Measurement)
/تابع/

مضروباً بـ	إلى	التحوّل من
4.788026 E + 01	pascal, Pa	pound force per square foot, lbf/ft^2
1.751268 E + 02	newton per meter, N/m	pound force per inch, lbf/in
6.894757 E + 03	pascal, Pa	pound force per square inch, lbf/in^2 (psi)
1.101221 E - 03	cubic meter, m^3	quart, qt (U.S. dry)
9.463529 E - 04	cubic meter, m^3	quart, qt (U.S. liquid)
5.029210 E + 00	meter, m	rod
4.848137 E - 06	radian, rad	second (angle)
9.972696 E - 01	second, s	second (sidereal)
9.290304* E + 00	square meter, m^2	square (100 ft^2)
2.916667 E - 02	kilogram, kg	ton (assay)
1.016047 E + 03	kilogram, kg	ton (long, 2240 lb)
1.000000* E + 03	kilogram, kg	ton (metric)
3.516800 E + 03	watt, W	ton (refrigeration)
2.831685 E + 00	cubic meter, m^3	ton (register)
9.071847 E + 02	kilogram, kg	ton (short, 2000 lb)
1.38939 E + 03	kilogram per cubic meter, kg/m^3	ton (long per cubic yard, ton)/yd^3
1.186553 E + 03	kilogram per cubic meter, kg/m^3	ton (short per cubic yard, ton)/yd^3
8.896444 E + 03	newton, N	ton force (2000 lbf)
1.000000* E + 03	kilogram, kg	tonne, t
3.600000* E + 03	joule, J	watt hour, Wh
9.144000* E - 01	meter, m	yard, yd

الجدول 1.3 عوامل التحويل إلى نظام الواحدات الدولي للقياسات (SI Units of Measurement)
/تابع/

مضروباً بـ	إلى	التحوّل من
8.361274 E - 01	square meter, m^2	square yard, yd^2
7.645549 E - 01	cubic meter, m^3	cubic yard, yd^3
3.153600* + E + 07	second, s	year (365 days)
3.155815 E + 07	second, s	year (sidereal)

* تعني أن جميع القيم التي وضعت عليها هذه الإشارة هي قيم دقيقة. أُخذَ هذا الجدول من؛
.E380, "Standard for Metric Practice." American Society for Testing and Materials

2

الصيغ الخاصة بالجيزان

Beam Formulas

أثناء عملية تحليل الجيزان ذات النماذج المتعددة، تستخدم الخصائص الهندسية للمقاطع العرضية المتنوعة للمساحات. يعطينا الشكل 2.1 المعادلات الخاصة بحساب المساحة A وعزم العطالة I ومعامل المقطع أو النسبة $S = I/C$، حيث C هي المسافة من المحور المحايد إلى أبعد ليف في المقطع العرضي للجائز أو لأي عنصر إنشائي آخر. الواحدات المستخدمة هي الإنشات والميليمترات وقواها (مضاعفاتها). الصيغ الموجودة في الشكل 2.1 صحيحة في كل من نظامي الواحدات USCS وSI.

لقد تم إعطاء صيغ مساعدة خاصة ببضعة مجموعات من نماذج مختلفة للجيزان في الشكل 2.2. يمكن استخدام كل من نظامي الواحدات USCS وSI في أي صيغة من الصيغ القابلة للتطبيق على الجيزان الفولاذية والخشبية.

لاحظ أن: W = الحمولة، lb (kN)

L = الطول، ft (m)

R = رد الفعل، lb (kN)

V = قوة القص، lb (kN)

M = عزم الانعطاف (الانحناء)، lb.ft (N.m)

D = التشوّه (الانزياح أو التحوّل الناتج عن الحمولة)، ft (m)

a = التباعد المجازي للحمولة عن أحد طرفي الجائز، ft (m)

b = التباعد المجازي للحمولة عن الطرف الآخر، ft (m)

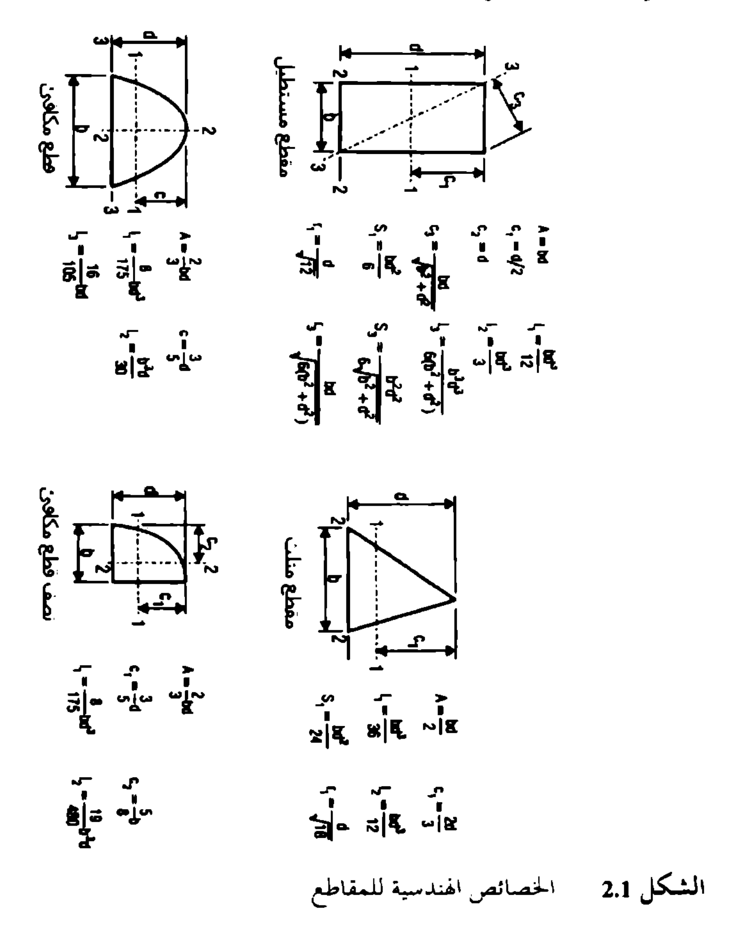
E = عامل المرونة، lb/in^2 (kPa)

I = عزم العطالة in^4 (dm^4)

$<$ = أقل من

$>$ = أكبر من

يعطي الشكل 2.3 معادلات الخط المرن (elastic-curve) من أجل أنواع متعددة من الجيزان الموشورية*. وسُمِّيتْ الحمولة في هذه المعادلات بـ P, lb (kN). والتباعد المجازي بـ k, ft (m) وبـ c, ft (m)



الشكل 2.1 الخصائص الهندسية للمقاطع

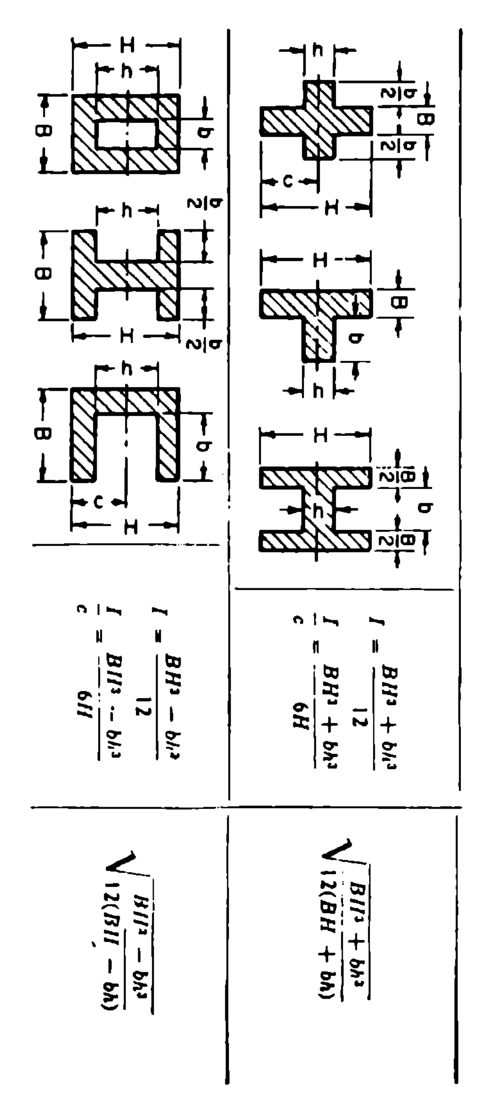
---

* الجيزان الموشورية هي جيزان ذات مقطع عرضي ثابت. سميت بذلك لأن التباعد بين أحرف أو مولدات الموشور يبقى ثابتاً؛ يعني أن مساحة المقطع العرضي للموشور ثابتة. (المعدّ).

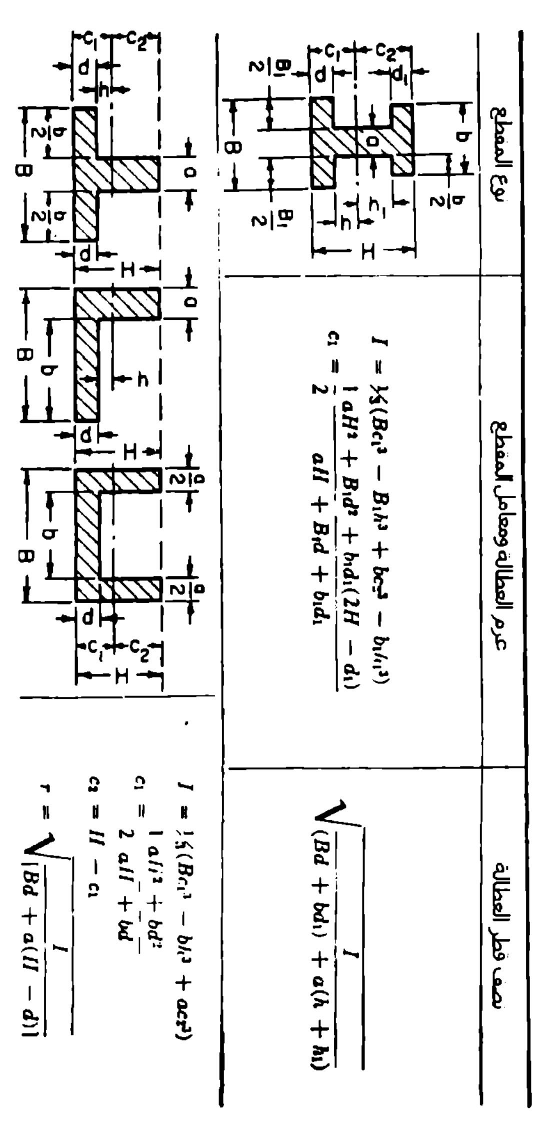
نوع المقطع	عزم العطالة	معامل المقطع	نصف قطر العطالة*
Equilateral Polygon A = area R = rad circumscribed circle r = rad inscribed circle n = no. sides a = length of side Axis as in preceding section of octagon	$I = \frac{A}{24}(6R^2 - a^2)$ $= \frac{A}{48}(12r^2 + a^2)$ $= \frac{AR^2}{4}$ (approx)	$\frac{I}{c} = \frac{I}{r}$ $= \frac{I}{R \cos \frac{180^\circ}{n}}$ $= \frac{AR}{4}$ (approx)	$\sqrt{\frac{6R^2 - a^2}{24}} = \frac{R}{2}$ $\sqrt{\frac{12r^2 + a^2}{48}}$
b, c, h, $\frac{b_1}{2}$, $\frac{b_1}{2}$	$I = \frac{6b^2 + 6bb_1 + b_1^2}{36(2b + b_1)} h^3$ $c = \frac{1}{3} \frac{3b + 2b_1}{2b + b_1} h$	$\frac{I}{c} = \frac{6b^2 + 6bb_1 + b_1^2}{12(3b + 2b_1)} h^2$	$\frac{h\sqrt{12b^2 + 12bb_1 + 2b_1^2}}{6(2b + b_1)}$

* وسمى أيضاً بنصف قطر الدوران

الشكل 2.1 /تابع/ الخصائص الهندسية للمقاطع



الشكل 2.1 /تابع/ الخصائص الهندسية للمقاطع



نوع المقطع	عزم العطالة ومعامل المقطع	نصف قطر العطالة
	$I = \frac{1}{3}(Bc_1^3 - B_1h^3 + bc_2^3 - b_1h_1^3)$ $c_1 = \frac{1}{2}\frac{aH^2 + B_1d^2 + b_1d_1(2H - d_1)}{aH + B_1d + b_1d_1}$	$\sqrt{\frac{I}{(Bd + bd_1) + a(h + h_1)}}$
	$I = \frac{1}{3}(Bc_1^3 - bh^3 + ac_2^3)$ $c_1 = \frac{1}{2}\frac{aH^2 + bd^2}{aH + bd}$ $c_2 = H - c_1$ $r = \sqrt{\frac{I}{[Bd + a(H - d)]}}$	

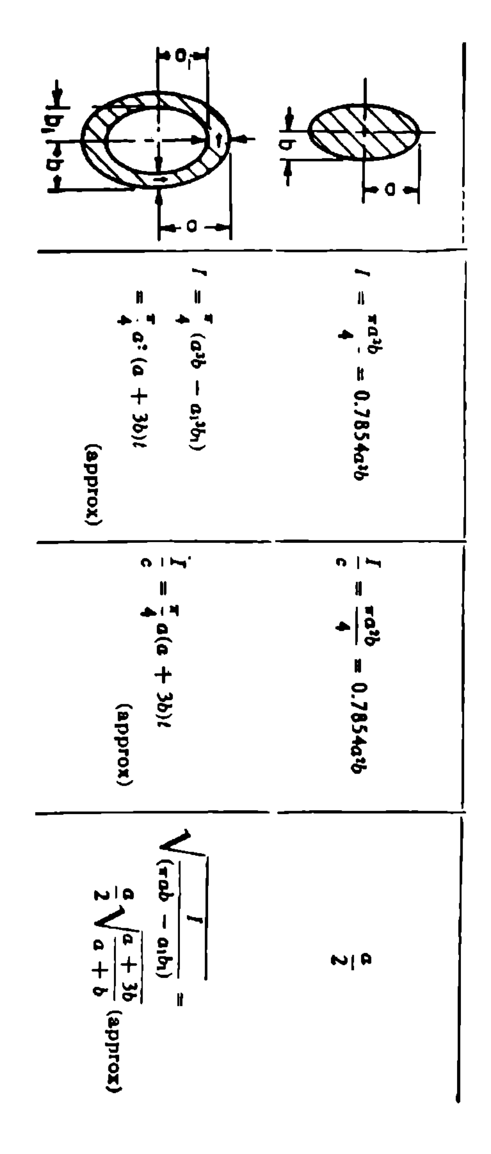
الشكل 2.1 /تابع/ الخصائص الهندسية للمقاطع

نوع المقطع	عزم العطالة	معامل المقطع	نصف قطر العطالة
d, r	$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{A}{4} r^2$ $= 0.05 d^4$ (approx)	$\frac{I}{c} = \frac{\pi d^3}{32} = \frac{\pi r^3}{4} = \frac{A}{4} r$ $= 0.1 d^3$ (approx)	$\frac{r}{2} = \frac{d}{4}$
d, r, R, D $d_m = \frac{1}{2}(D + d)$ $s = \frac{1}{2}(D - d)$	$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$ $= \frac{\pi}{4}(R^4 - r^4)$ $= \frac{1}{4} A(R^2 + r^2)$ $= 0.05(D^4 - d^4)$ (approx)	$\frac{I}{c} = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D}$ $= \frac{\pi}{4} \frac{R^4 - r^4}{R}$ $= 0.8 d_m^2 s$ (approx) when $\frac{s}{d_m}$ is very small	$\frac{\sqrt{R^2 + r^2}}{2} = \frac{\sqrt{D^2 + d^2}}{4}$

الشكل 2.1 /تابع/ الخصائص الهندسية للمقاطع

نوع المقطع	عزم العطالة	معامل المقطع	نصف قطر العطالة
(semicircle; c_1, c_2, r)	$I = r^4\left(\frac{\pi}{8} - \frac{8}{9\pi}\right) = 0.1098r^4$	$\frac{I}{c_2} = 0.1908r^3$ $\frac{I}{c_1} = 0.2587r^3$ $c_1 = 0.4244r$	$\frac{\sqrt{9\pi^2 - 64}}{6\pi}r = 0.264r$
(half ring; c_1, c_2, t, r, r_1, R)	$I = 0.1098(R^4 - r^4) - \frac{0.283R^2r^2(R - r)}{R + r}$ $= 0.3tr_1^3$ (approx) when $\frac{t}{r_1}$ is very small	$c_1 = \frac{4}{3\pi}\frac{R^2 + Rr + r^2}{R + r}$ $c_2 = R - c_1$	$\sqrt{\frac{2I}{\pi(R^2 - r^2)}}$ $= 0.31r_1$ (approx)

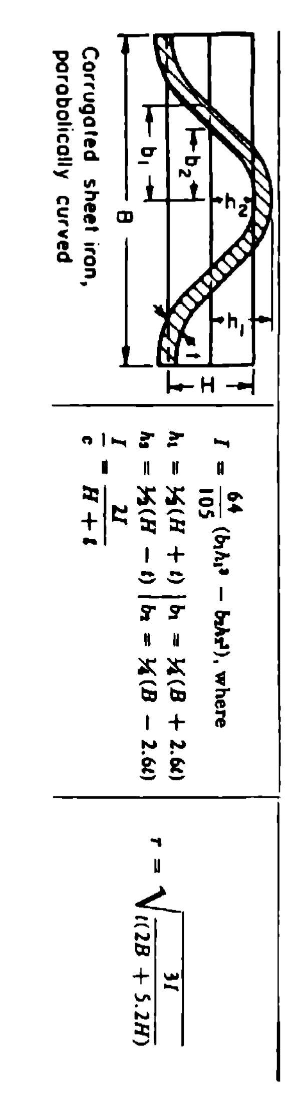
الشكل 2.1 /تابع/ الخصائص الهندسية للمقاطع



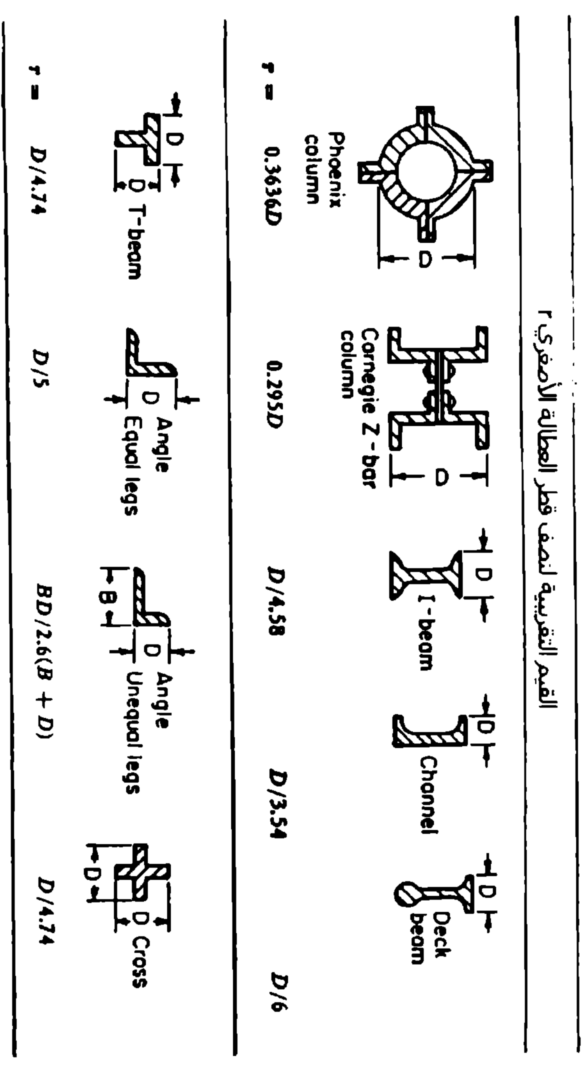
الشكل 2.1 /تابع/ الخصائص الهندسية للمقاطع

نوع المقطع	عزم العطالة وعامل المقطع	عامل المقطع
	$I = \frac{1}{12}\left[\frac{3\pi}{16}d^4 + b(h^3 - d^3) + b^3(h - d)\right]$ $\frac{I}{c} = \frac{1}{6h}\left[\frac{3\pi}{16}d^4 + b(h^3 + d^3) + b^3(h - d)\right]$	$\sqrt{\frac{I}{\pi\frac{d^2}{4} + 2b(h - d)}}$ (approx)
	$I = \frac{t}{4}\left(\frac{\pi B^3}{16} + B^2h + \frac{\pi B h^2}{2} + \frac{2}{3}h^3\right)$ $h = H - \frac{1}{2}B$ $\frac{I}{c} = \frac{2I}{H + t}$	$\sqrt{\frac{I}{2\left(\frac{\pi B}{4} + h\right)t}}$

الشكل 2.1 /تابع/ الخصائص الهندسية للمقاطع



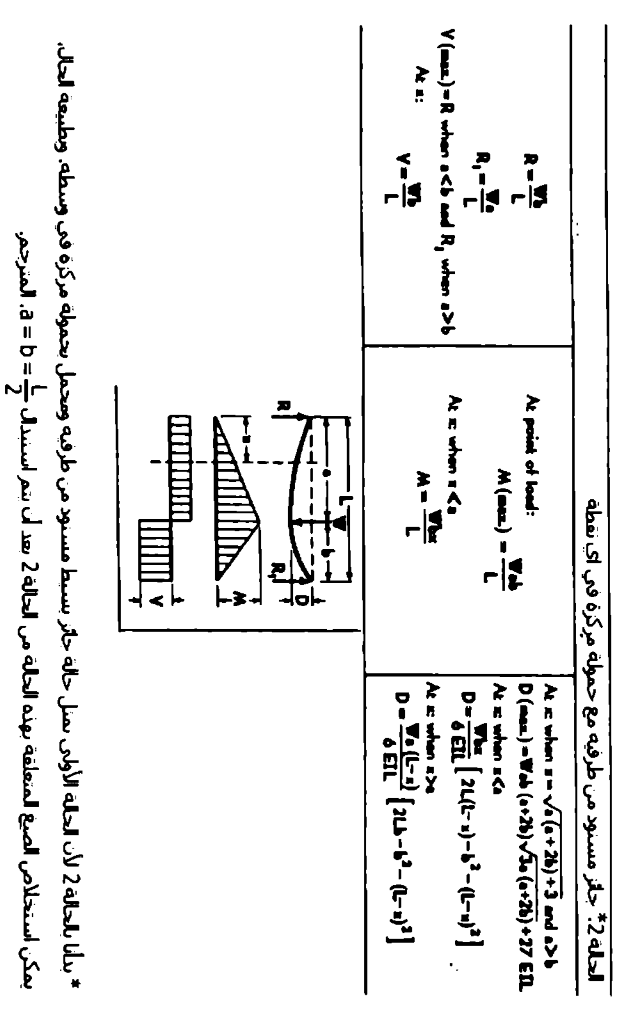
الشكل 2.1 /تابع/ الخصائص الهندسية للمقاطع



القيم التقريبية لنصف قطر العطالة الأصغري r

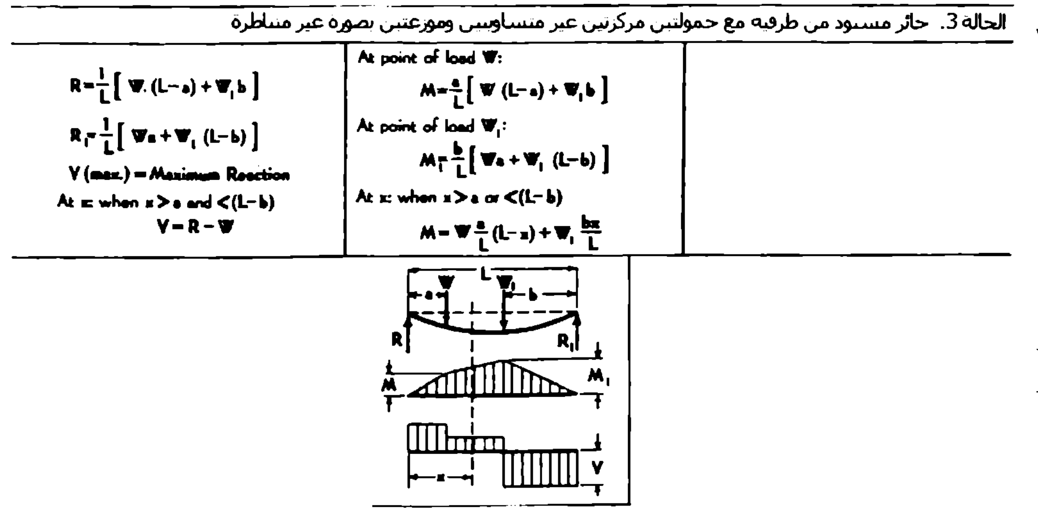
Shape	Phoenix column	Carnegie Z-bar column	I-beam	Channel	Deck beam
$r =$	$0.3636D$	$0.295D$	$D/4.58$	$D/3.54$	$D/6$
Shape	T-beam	Angle Equal legs	Angle Unequal legs	Cross	
$r =$	$D/4.74$	$D/5$	$BD/2.6(B + D)$	$D/4.74$	

الشكل 2.1 /تابع/ الخصائص الهندسية للمقاطع



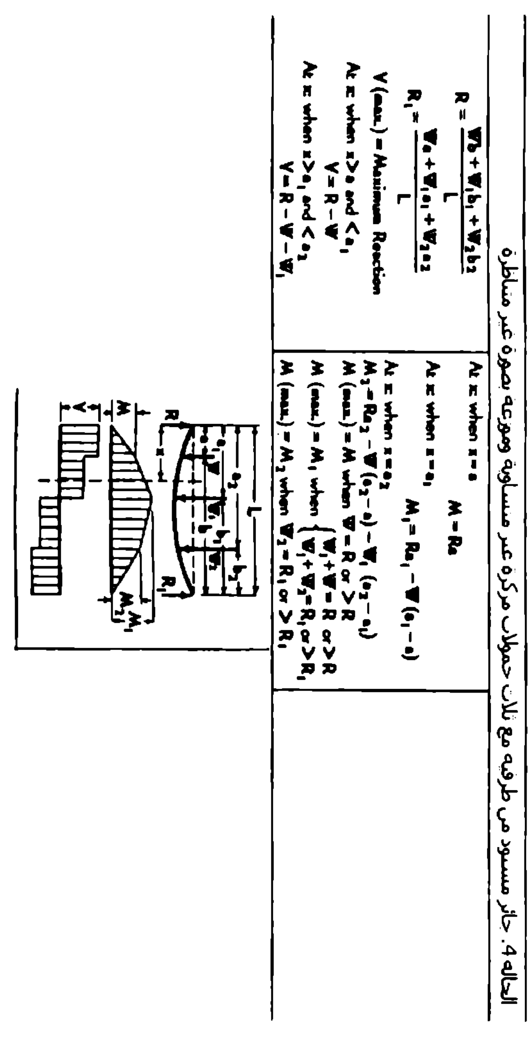
الشكل 2.2 الصيغ الخاصة بالجيزان. مأخوذة من

(From J. Callender, Time-Saver Standards for Architectural Design Data, 6th ed., McGraw-Hill, N.Y.)



الحالة 3. حائر مسنود من طرفيه مع حمولتين مركزتين غير متساويين وموزعتين بصورة غير متناظرة		
$R = \frac{1}{L}[W(L-a) + W_1 b]$ $R_1 = \frac{1}{L}[Wa + W_1(L-b)]$ V (max.) = Maximum Reaction At x when x > a and < (L−b) $V = R - W$	At point of load W: $M = \frac{a}{L}[W(L-a) + W_1 b]$ At point of load W_1: $M_1 = \frac{b}{L}[Wa + W_1(L-b)]$ At x: when x > a or < (L−b) $M = W\frac{a}{L}(L-x) + W_1\frac{bx}{L}$	

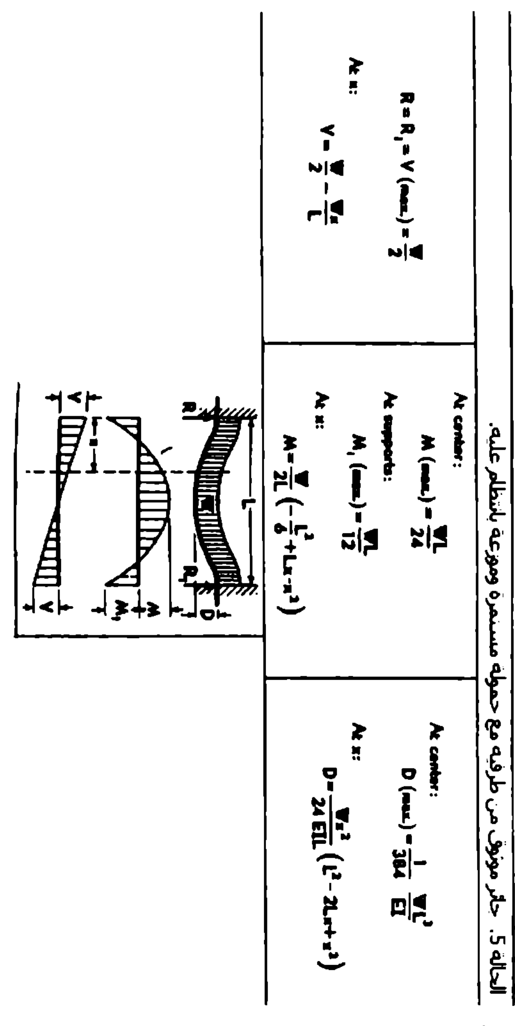
الشكل 2.2 الصيغ الخاصة بالجيزان /تابع/ .



الحاله 4. جائر مسنود من طرفيه مع ثلاث حمولات مركزة غير متساوية وموزعة بصورة غير متناظرة

$R = \frac{Wb + W_1 b_1 + W_2 b_2}{L}$ $R_1 = \frac{Wa + W_1 a_1 + W_2 a_2}{L}$ V (max.) = Maximum Reaction At x when $x > a$ and $< a_1$ $V = R - W$ At x when $x > a_1$ and $< a_2$ $V = R - W - W_1$	At x when $x = a$ $M = Ra$ At x when $x = a_1$ $M_1 = Ra_1 - W(a_1 - a)$ At x when $x = a_2$ $M_2 = Ra_2 - W(a_2 - a) - W_1(a_2 - a_1)$ M (max.) = M when $W = R$ or $> R$ M (max.) = M_1 when $\begin{cases} W_1 + W = R \text{ or} > R \\ W_1 + W_2 = R_1 \text{ or} > R_1 \end{cases}$ M (max.) = M_2 when $W_2 = R_1$ or $> R_1$

الشكل 2.2 /تابع/ الصيغ الخاصة بالجيزان.



الحالة 5. جائز مرفوع من طرفيه مع حمولة مستمرة وموزعة بانتظام عليه.

$R = R_1 = V\ (\text{max.}) = \frac{W}{2}$

At x:

$V = \frac{W}{2} - \frac{Wx}{L}$

At center:

$M\ (\text{max.}) = \frac{WL}{24}$

At supports:

$M_1\ (\text{max.}) = \frac{WL}{12}$

At x:

$M = \frac{W}{2L}\left(-\frac{L^2}{6} + Lx - x^2\right)$

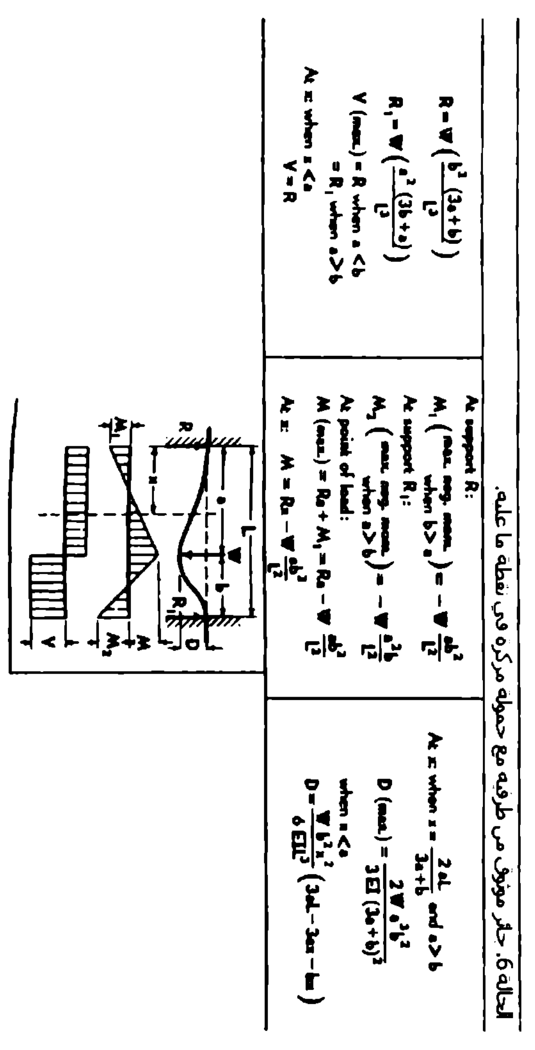
At center:

$D\ (\text{max.}) = \frac{1}{384}\,\frac{WL^3}{EI}$

At x:

$D = \frac{Wx^2}{24\,EIL}\left(L^2 - 2Lx + x^2\right)$

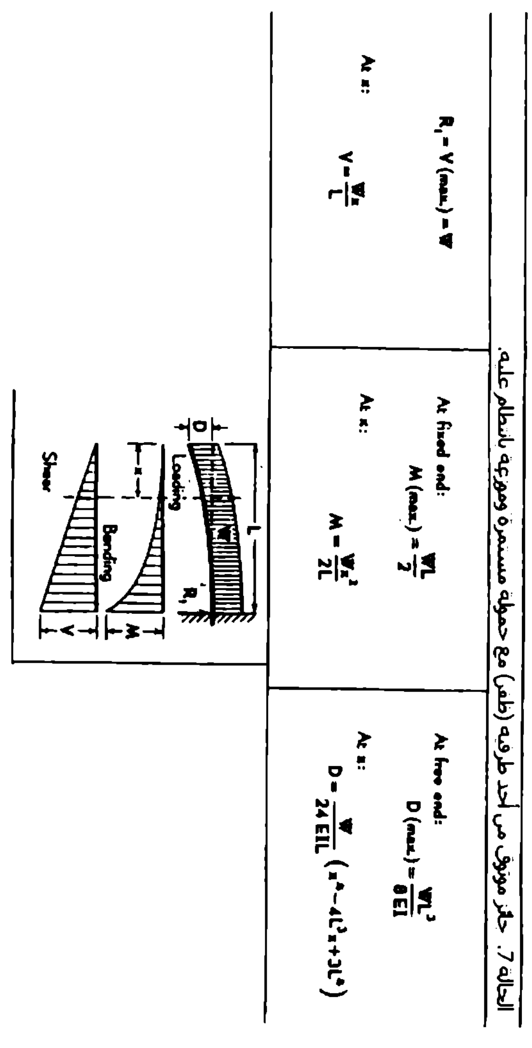
الشكل 2.2 /تابع/ الصيغ الخاصة بالجيزان.



الحالة 6. جائز موثوق من طرفيه مع حمولة مركزة في نقطة ما عليه.

$R = W\left(\frac{b^2(3a+b)}{L^3}\right)$ $R_1 = W\left(\frac{a^2(3b+a)}{L^3}\right)$ V (max.) = R when a < b = R_1 when a > b At x: when x < a V = R	At support R: $M_1\left(\begin{smallmatrix}\text{max. neg. mom.}\\ \text{when } b>a\end{smallmatrix}\right) = -W\frac{ab^2}{L^2}$ At support R_1: $M_2\left(\begin{smallmatrix}\text{max. neg. mom.}\\ \text{when } a>b\end{smallmatrix}\right) = -W\frac{a^2b}{L^2}$ At point of load: $M\,(\text{max.}) = Ra + M_1 = Ra - W\frac{ab^2}{L^2}$ At x: $M = Rx - W\frac{ab^2}{L^2}$	At x: when $x = \frac{2aL}{3a+b}$ and a > b $D\,(\text{max.}) = \frac{2Wa^3b^2}{3EI(3a+b)^2}$ when x < a $D = \frac{Wb^2x^2}{6EIL^3}(3aL - 3ax - bx)$

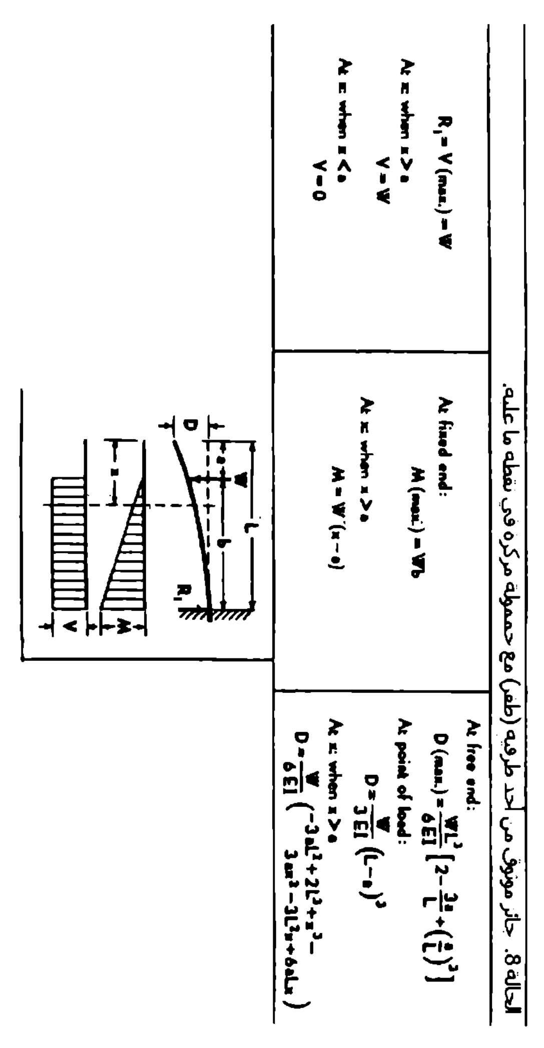
الشكل 2.2 /تابع/ الصيغ الخاصة بالجيزان.



الحالة 7. جائز موثوق من أحد طرفيه (ظفر) مع حمولة مستمرة وموزعة بانتظام عليه.

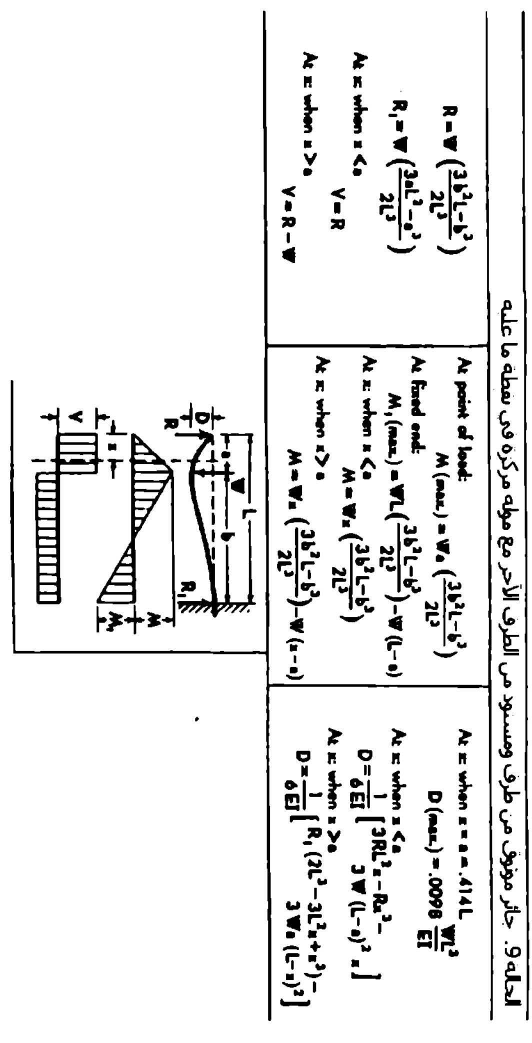
$R_1 = V\,(max.) = W$	At fixed end: $M\,(max.) = \frac{WL}{2}$	At free end: $D\,(max.) = \frac{WL^3}{8EI}$
At x: $V = \frac{Wx}{L}$	At x: $M = \frac{Wx^2}{2L}$	At x: $D = \frac{W}{24\,EIL}\left(x^4 - 4L^3x + 3L^4\right)$

الشكل 2.2 /تابع/ الصيغ الخاصة بالجيزان.



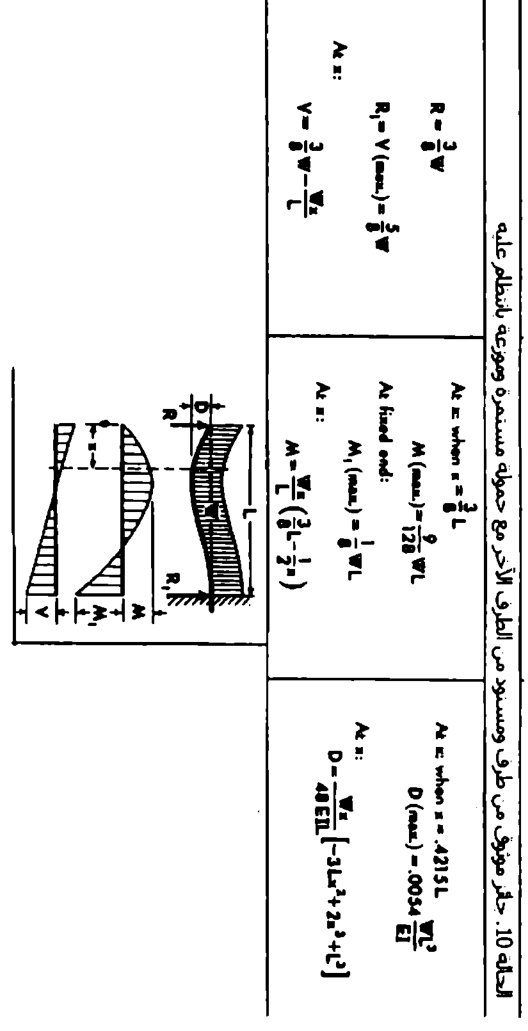
الحالة 8. جائز مدعوم من أحد طرفيه (ظفر) مع حمولة مركزة في نقطة ما عليه.		
At free end: $D(max.) = \frac{WL^3}{6EI}\left[2 - \frac{3a}{L} + \left(\frac{a}{L}\right)^3\right]$ At point of load: $D = \frac{W}{3EI}(L-a)^3$ At x when $x > a$ $D = \frac{W}{6EI}(-3aL^2 + 2L^3 + x^3 - 3ax^2 - 3L^2x + 6aLx)$	At fixed end: $M(max.) = Wb$ At x when $x > a$ $M = W(x-a)$	$R_1 = V(max.) = W$ At x when $x > a$ $V = W$ At x when $x < a$ $V = 0$

الشكل 2.2 /تابع/ الصيغ الخاصة بالجيزان.



الحاله 9. جائز موثوق من طرف ومسنود من الطرف الآخر مع موله مركزة في نقطة ما عليه		
$R = W\left(\frac{3b^2L - b^3}{2L^3}\right)$ $R_1 = W\left(\frac{3aL^2 - a^3}{2L^3}\right)$ At x when x < a $V = R$ At x when x > a $V = R - W$	At point of load: $M(max.) = Wa\left(\frac{3b^2L - b^3}{2L^3}\right)$ At fixed end: $M_1(max.) = WL\left(\frac{3b^2L - b^3}{2L^3}\right) - W(L-a)$ At x when x < a $M = Wx\left(\frac{3b^2L - b^3}{2L^3}\right)$ At x when x > a $M = Wx\left(\frac{3b^2L - b^3}{2L^3}\right) - W(x-a)$	At x when x = a = .414L $D(max.) = .0098\frac{WL^3}{EI}$ At x when x < a $D = \frac{1}{6EI}\left[3RL^2x - Rx^3 - 3W(L-a)^2x\right]$ At x when x > a $D = \frac{1}{6EI}\left[R_1(2L^3 - 3L^2x + x^3) - 3Wa(L-x)^2\right]$

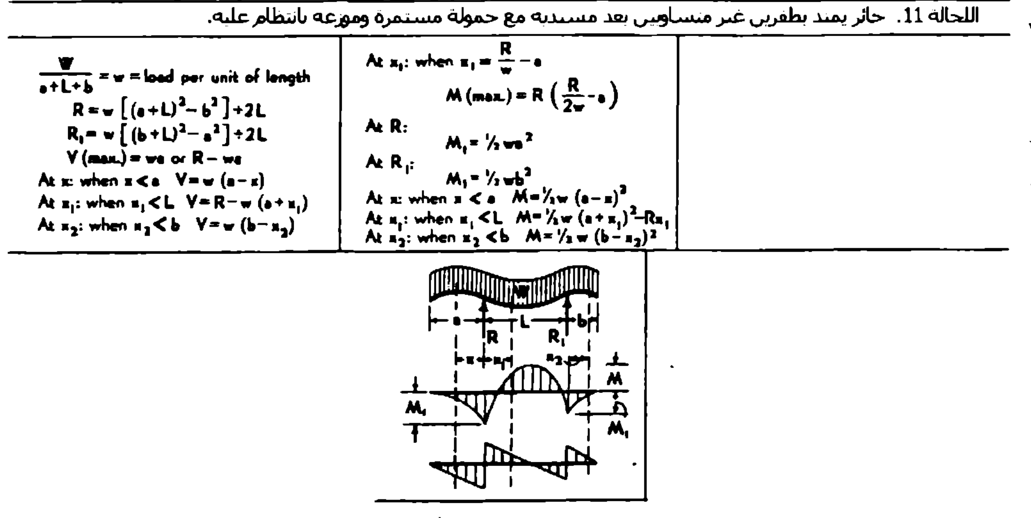
الشكل 2.2 /تابع/ الصيغ الخاصة بالجيزان.



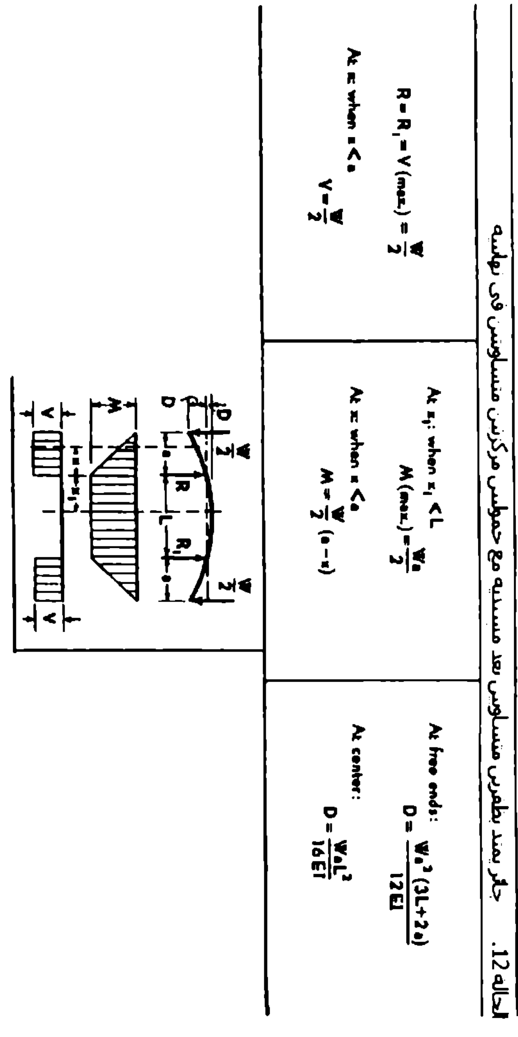
الشكل 2.2 /تابع/ الصيغ الخاصة بالجيزان.

اللحالة 11. حائر يمتد بطرفين غير متساويين بعد مسنديه مع حمولة مستمرة وموزعة بانتظام عليه.

$\frac{W}{a+L+b} = w =$ load per unit of length $R = w\left[(a+L)^2 - b^2\right] \div 2L$ $R_1 = w\left[(b+L)^2 - a^2\right] \div 2L$ $V(\text{max.}) = wa$ or $R - wa$ At x: when $x < a$ $V = w(a-x)$ At x_1: when $x_1 < L$ $V = R - w(a+x_1)$ At x_2: when $x_2 < b$ $V = w(b-x_2)$	At x_1: when $x_1 = \frac{R}{w} - a$ $M(\text{max.}) = R\left(\frac{R}{2w} - a\right)$ At R: $M_1 = \frac{1}{2}wa^2$ At R_1: $M_1 = \frac{1}{2}wb^2$ At x: when $x < a$ $M = \frac{1}{2}w(a-x)^2$ At x_1: when $x_1 < L$ $M = \frac{1}{2}w(a+x_1)^2 - Rx_1$ At x_2: when $x_2 < b$ $M = \frac{1}{2}w(b-x_2)^2$	



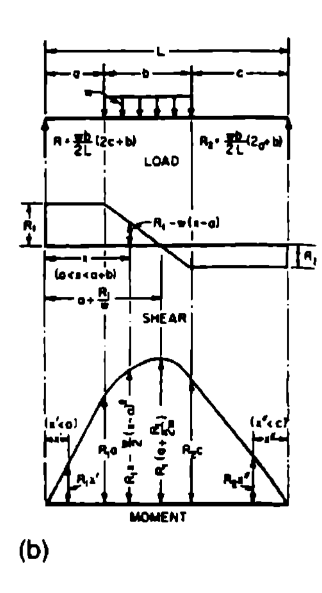
الشكل 2.2 /تابع/ الصيغ الخاصة بالجيزان.



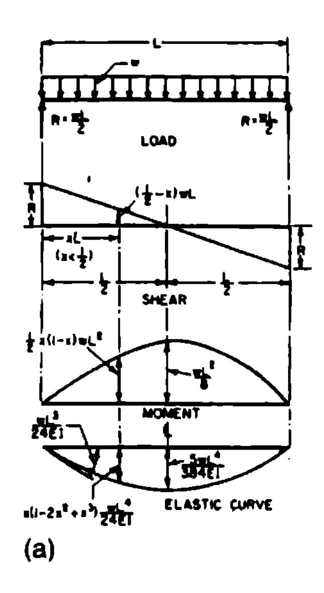
الحالة 12. جائز يمتد بطرفين متساويين بعد مسنديه مع حمولين مركزين متساويين في نهايته

$R = R_1 = V(max.) = \frac{W}{2}$ At x when $x < a$ $V = \frac{W}{2}$	At x_1: when $x_1 < L$ $M(max.) = \frac{Wa}{2}$ At x when $x < a$ $M = \frac{W}{2}(a - x)$	At free ends: $D = \frac{Wa^2(3L + 2a)}{12EI}$ At center: $D = \frac{WaL^2}{16EI}$

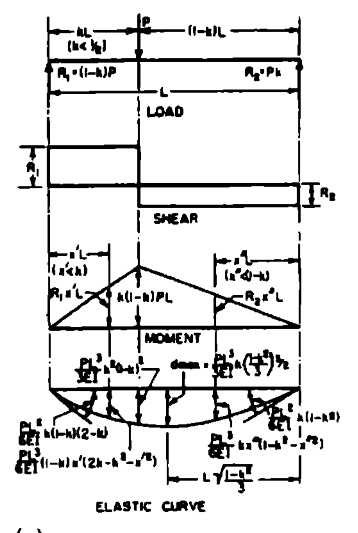
الشكل 2.2 /تابع/ الصيغ الخاصة بالجيزان.



(b)



(a)



(c)

الشكل 2.3 معادلات الخط المرن للجيزان الموشورية. (a) مخطط قوى القص والعزوم والتشوهات (السهوم والدورانات) لجائز موشوري يستند استناداً بسيطاً ومحمّل بحمولة مستمرة منتظمة. (b) مخطط قوى القص والعزوم لجائز موشوري يستند استناداً بسيطاً ومحمل بحمولة مستمرة منتظمة تمتد على جزء منه. (c) مخطط قوى القص والعزوم والتشوهات لجائز موشوري يستند استنادا بسيطاً ومحمل بحمولة مركزة في نقطة ما عليه.

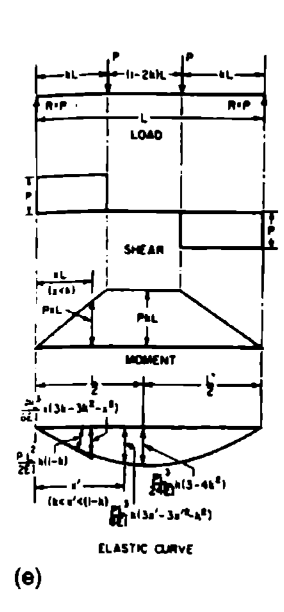
LOAD

SHEAR

MOMENT

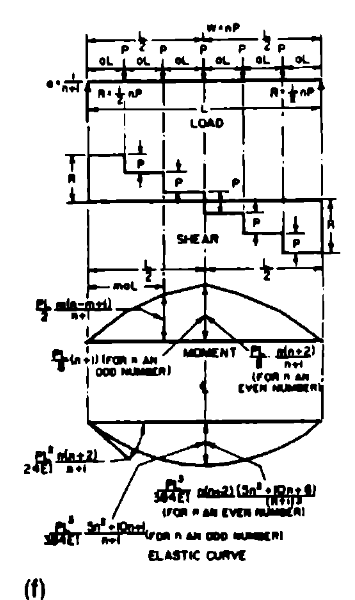
ELASTIC CURVE

(d)

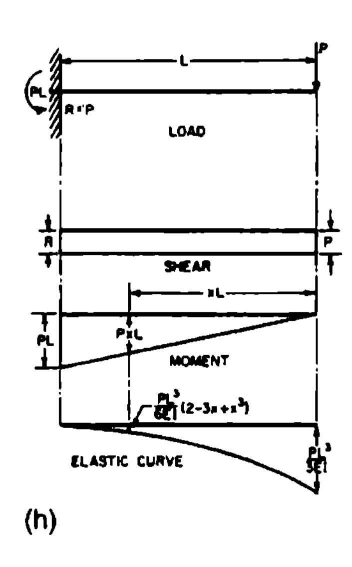


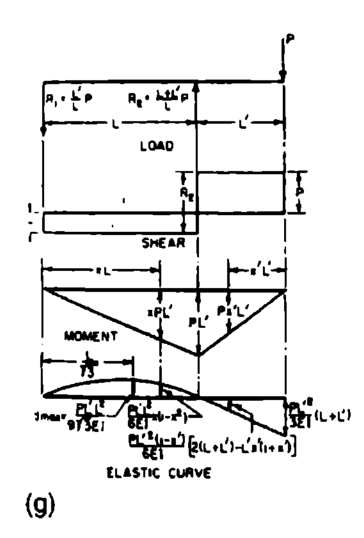
(e)

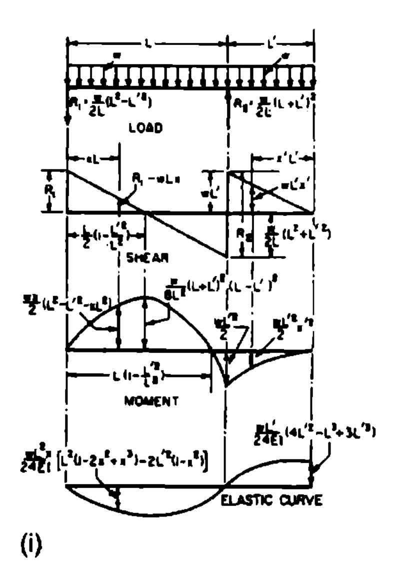
الشكل 2.3 /تابع/ معادلات الخط المرن للجيزان الموشورية. (d) مخطط قوى القص العزوم والتشوهات لجائز موشوري يستند استنادا بسيطاً ومحمل بحمولة مركزة في وسط مجازه. (e) مخطط قوى القص والعزوم والتشوهات لجائز موشوري يستند استناداً بسيطاً ومحمل بحمولتين مركزتين متساويتين. (f) مخطط قوى القص والعزوم والتشوهات لجائز موشوري يستند استنادا بسيطاً ومحمل بحمولات متساوية عديدة تتباعد بالتساوي على مجازه.



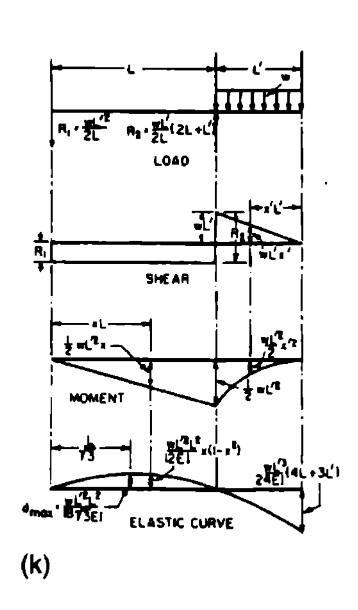
(f)



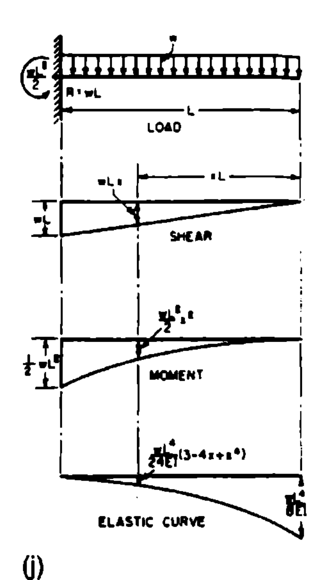




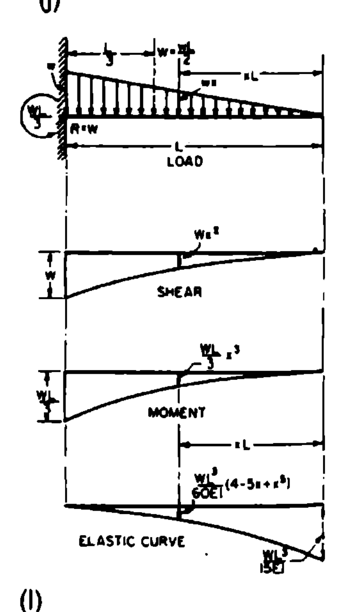
الشكل 2.3 /تابع/ معادلات الخط المرن للجيزان الموشورية. (g) مخطط قوى القص والعزوم والتشوهات لجائز بسيط يمتد بظفر ومحمل بحمولة مركزة في ظفره. (h) مخطط قوى القص والعزوم والتشوهات لظفر موشوري محمل بحمولة مركزة في طرفه. (i) مخطط قوى القص والعزوم والتشوهات لجائز بسيط يمتد بظفر ومحمل بحمولة منتظمة مستمرة ممتدة على كامل مجازه.



(k)

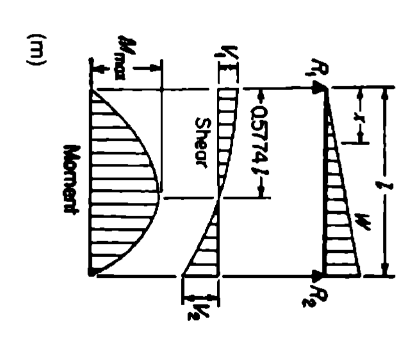


(j)



(l)

الشكل 2.3 /تابع/ معادلات الخط المرن للجيزان الموشورية.(j) مخطط قوى القص والعزوم والتشوهات لظفر محمل بحمولة مستمرة منتظمة تمتد على كامل مجازه.(k) مخطط قوى القص والعزوم والتشوهات لجائز بسيط يمتد بظفر ومحمل بحمولة منتظمة تتوزع على ظفره فقط. (l) مخطط قوى القص والعزوم والتشوهات لظفر موشوري محمل بحمولة موزعة مثلثية.



$$R_1 = V_1 = \frac{W}{3}$$

$$R_2 = V_{2\,max} = \frac{2W}{3}$$

$$V_x = \frac{W}{3} - \frac{Wx^2}{l^2}$$

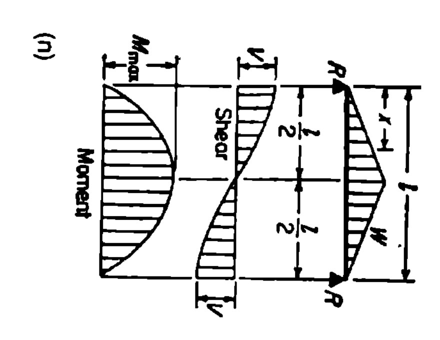
$$M_{max}\left(\text{at } x = \frac{l}{\sqrt{3}} = .5774l\right) = \frac{2Wl}{9\sqrt{3}} = .1283Wl$$

$$M_x = \frac{Wx}{3l^2}(l^2 - x^2)$$

$$\Delta_{max}\left(\text{at } x = l\sqrt{1 - \sqrt{\frac{8}{15}}} = .5193l\right) = .01304\frac{Wl^3}{EI}$$

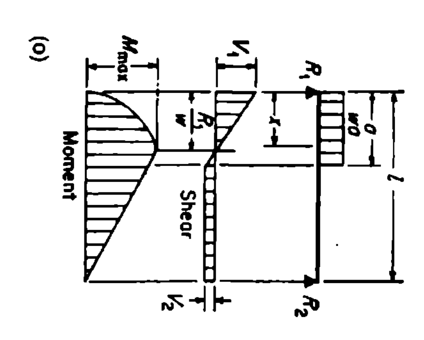
$$\Delta_x = \frac{Wx}{180EIl^2}(3x^4 - 10l^2x^2 + 7l^4)$$

الشكل 2.3 /تابع/ معادلات الخط المرن للجيزان الموشورية. (m) جائز بسيط ومحمل بحمولة تتزايد بانتظام بدءاً من أحد طرفيه.



$R = V$	$= \frac{W}{2}$
$V_x \left(\text{when } x < \frac{l}{2}\right)$	$= \frac{W}{2l^2}(l^2 - 4x^2)$
M_{max} (at center)	$= \frac{Wl}{6}$
$M_x \left(\text{when } x < \frac{l}{2}\right)$	$= Wx\left(\frac{1}{2} - \frac{2x^2}{3l^2}\right)$
Δ_{max} (at center)	$= \frac{Wl^3}{60EI}$
Δ_x	$= \frac{Wx}{480EI\,l^2}(5l^2 - 4x^2)^2$

الشكل 2.3 /تابع/ معادلات الخط المرن للجيزان الموشورية. (n) جائز بسيط ومحمل بحمولة تتزايد بانتظام بدءاً من طرفيه إلى وسطه.



$$R_1 = V_{1\,max} = \frac{wa}{2l}(2l - a)$$

$$R_2 = V_2 = \frac{wa^2}{2l}$$

$$V \text{ (when } x < a) = R_1 - wx$$

$$M_{max}\left(\text{at } x = \frac{R_1}{w}\right) = \frac{R_1^2}{2w}$$

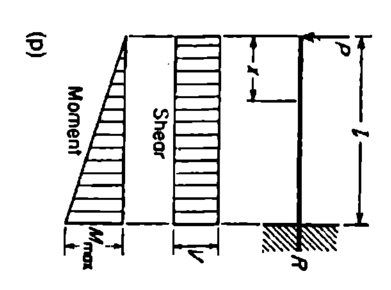
$$M_x \text{ (when } x < a) = R_1x - \frac{wx^2}{2}$$

$$M_x \text{ (when } x > a) = R_2(l - x)$$

$$\Delta_x \text{ (when } x < a) = \frac{wx}{24EIl}[a^2(2l - a)^2 - 2ax^2(2l - a) + lx^3]$$

$$\Delta_x \text{ (when } x > a) = \frac{wa^2(l - x)}{24EIl}(4xl - 2x^2 - a^2)$$

الشكل 2.3 /تابع/ معادلات الخط المرن للجيزان الموشورية. (o) جائز بسيط محمل بحمولة منتظمة تتوزع جزئياً على أحد طرفيه.



$$R = V = P$$

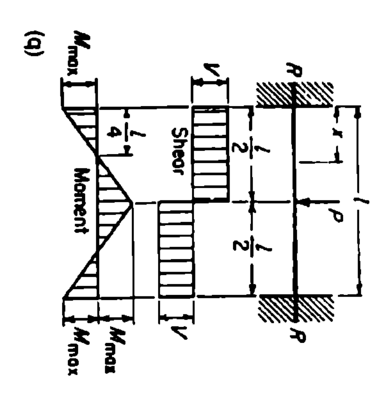
$$M_{max} \text{ (at fixed end)} = Pl$$

$$M_x = Px$$

$$\Delta_{max} \text{ (at free end)} = \frac{Pl^3}{3EI}$$

$$\Delta_x = \frac{P}{6EI}(2l^3 - 3l^2x + x^3)$$

الشكل 2.3 /تابع/ معادلات الخط المرن للجيزان الموشورية. (p) جائز ظفري محمل بحمولة مركزة في نهايته الطليقة.



$$R = V = \frac{P}{2}$$

$$M_{max} \text{ (at center and ends)} = \frac{Pl}{8}$$

$$M_x \left(\text{when } x < \frac{l}{2}\right) = \frac{P}{8}(4x - l)$$

$$\Delta_{max} \text{ (at center)} = \frac{Pl^3}{192EI}$$

$$\Delta_x = \frac{Px^2}{48EI}(3l - 4x)$$

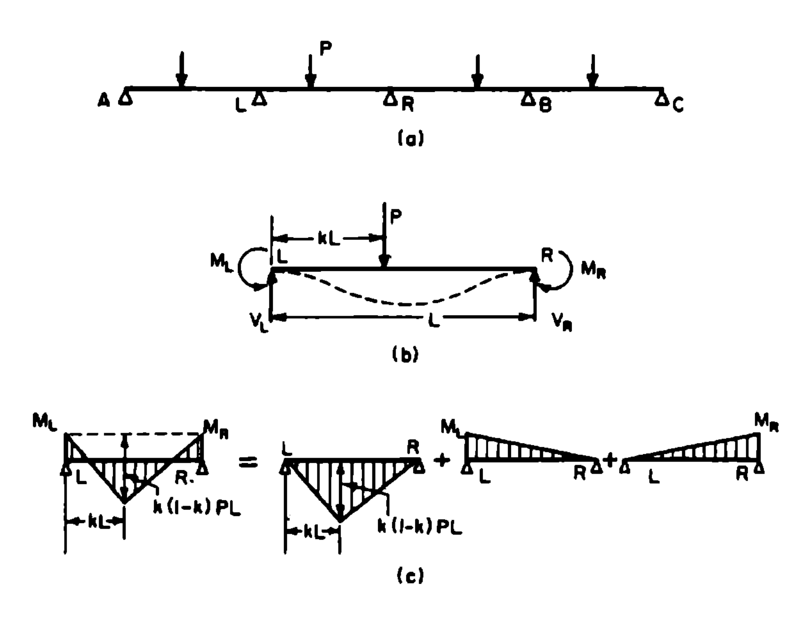
الشكل 2.3 /تابع/ معادلات الخط المرن للجيزان الموشورية. (q) جائز موثوق من طرفيه ومحمل بحمولة مركزة في وسطه.

الجيزان المستمرة Continuous Beams

الجيزان المستمرة والأُطر هي منشآت غير مقررة سكونياً (ستاتيكياً). فعزوم الإنعطاف في هذا النوع من الجيزان توابع للمقاطع الهندسية وعزوم العطالة والحمولات والمجازات وعامل المرونة الخاص بكل عنصر على انفراد. يبيّن الشكل 2.4 كيف يمكن معاملة أي جائز في جزائر مستمر كجائز منفرد، وذلك عن طريق مخطط عزم الانعطاف المحلل إلى مركباته الأساسية. وقد تم إيضاح الصيغ الخاصة بعملية التحليل على المخطط. أما ردود أفعال الجيزان المستمرة فيمكن إيجادها باستخدام الصيغ الموجودة في الشكل 2.5. كما أُعطيت صيغ عزوم الوثق للجيزان ذات عزم العطالة الثابت (جيزان موشورية) والمُحمّلة بحمولات من نماذج متنوعة وشائعة، في الشكل 2.6. يمكن استخدام المنحنيات في الشكل 2.7 لتسريع حساب عزوم الوثق في الجيزان الموشورية. وقبل أن يتم استخدام المنحنيات في الشكل 2.7 لابد أن تكون المواصفات المميزة لآلية التحميل قد تمّ حسابها عن طريق الصيغ الموجودة في الشكل 2.8. وتتضمن هذه المواصفات المميزة للتحميل؛ $\overline{x}L$، موقع مركز ثقل التحميل باعتبار أن الحمولات هي حمولة مركزة واحدة، و $G^2 = \sum b_n^2 P_n / W$، حيث b_nL هي المسافة من كل حمولة P_n إلى مركز ثقل التحميل (تؤخذ موجبة نحو اليمين)، و $S^3 = \sum b_n^3 P_n / W$. وقد أعطيت هذه القيم في الشكل 2.8 من أجل بعض نماذج التحميل الشائعة.

الصيغ المتعلقة بالعزوم الناشئة عن التشوهات (سهوم ودورانات) في جائز موثوق النهايتين، قد أعطيت في الشكل 2.9. ولاستخدام طريقة توزيع العزوم المعدّلة بالنسبة لجائز موثوق، كما هو الحال في الشكل 2.9، لابد أن تعرف أولاً عزوم الوثق لجائز ذي مساند متوضعة على سويات مختلفة. ففي الشكل 2.9، نلاحظ أن الطرف أو المسند الأيمن للجائز ذي المجاز L أعلى بمقدار d من الطرف الأيسر. ولإيجاد عزوم الوثق، نقوم أولاً بتشويه الجائز عن طريق وضع مفصلين في طرفيه؛

بعد ذلك نوثق الطرف الأيمن تاركين الطرف الأيسر متمفصلاً، كما في الشكل 2.9b.



الشكل 2.4 أي مجاز من الجائز المستمر (a) يمكن أن يُعامل كجائز بسيط كما هو موضح في الشكلين (b) و(c). لقد تم تحليل مخطط العزم في الشكل (c) إلى مركباته الأساسية.

بملاحظة أن الخط الواصل بين المسندين يصنع زاوية تساوي تقريباً إلى d/L (ظلها) بالمقارنة مع الوضع الأصلي للجائز، فإننا نقوم بتطبيق العزم عند الطرف المفصلي لتوليد دوران طرفي هناك مساوياً إلى d/L. وبمساعدة تعريف القساوة (الصلابة)، يساوي هذا العزم إلى ذلك العزم المبيّن على الطرف الأيسر في الشكل 2.9b. عملية مناقلة العزم إلى الطرف الأيمن موضحة بالصيغة العلوية على الطرف الأيمن للشكل 2.9b.

وباستخدام قانون التشوهات المتبادلة عكسياً، نحصل على عزوم الوثق للجائز المتشوّه في الشكل 2.9 كما يلي:

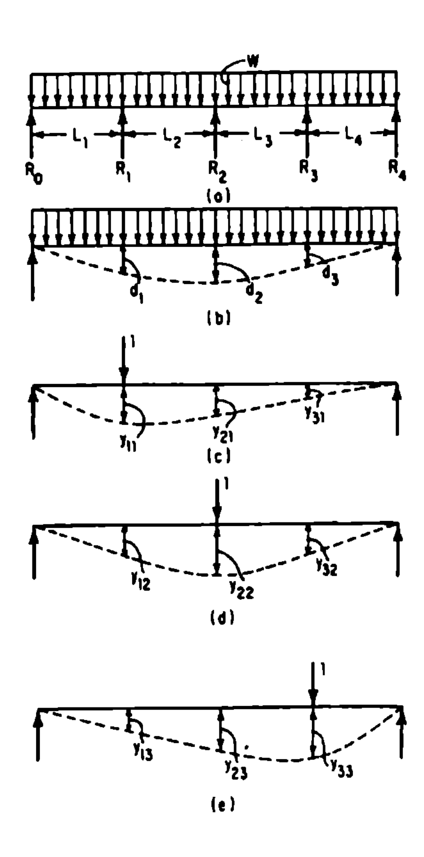
$$M_L^F = K_L^F\left(1 + C_R^F\right)\frac{d}{L} \qquad (2.1)$$

$$M_R^F = K_R^F\left(1 + C_L^F\right)\frac{d}{L} \qquad (2.2)$$

وبطريقة مشابهة يمكن إيجاد عزم الوثق، لجائز يستند على مسندين من سويتين مختلفتين أحدهما مفصل والآخر وثاقة، من العلاقة:

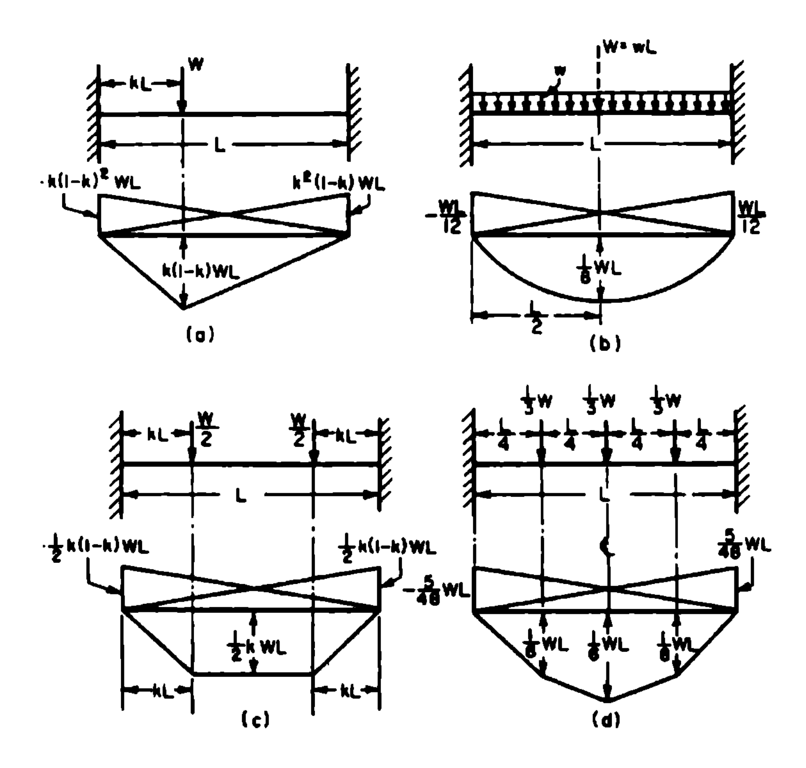
$$M^F = K\frac{d}{L} \qquad (2.3)$$

حيث K هي الصلابة الفعلية لنهاية الجائز الموثوقة؛ حيث أنه بالنسبة للجيزان ذات عزم العطالة المتغيّر، تساوي K إلى $\left(1 - C_L^F C_R^F\right)$ مرة من صلابة الوثاقة.



$$d_1 = y_{11}R_1 + y_{12}R_2 + y_{13}R_3$$
$$d_2 = y_{21}R_1 + y_{22}R_2 + y_{23}R_3$$
$$d_3 = y_{31}R_1 + y_{32}R_2 + y_{33}R_3$$

الشكل 2.5 يتمُّ إيجاد ردود الأفعال في الجائز المستمر (a)، بجعل الجائز مقرراً سكونياً (ستاتيكياً). عن طريق حذف المساند الداخلية مثلاً. في (b) تُحسب التشوهات (الموافقة) عند المساند الداخلية المستبعدة. في (c) و(d) و(e) تُحسب التشوهات من أجل حمولة واحدية مطبقة فوق كل مسند محذوف، وذلك للحصول على المعادلات المتعلقة بكل مجهول فائض.



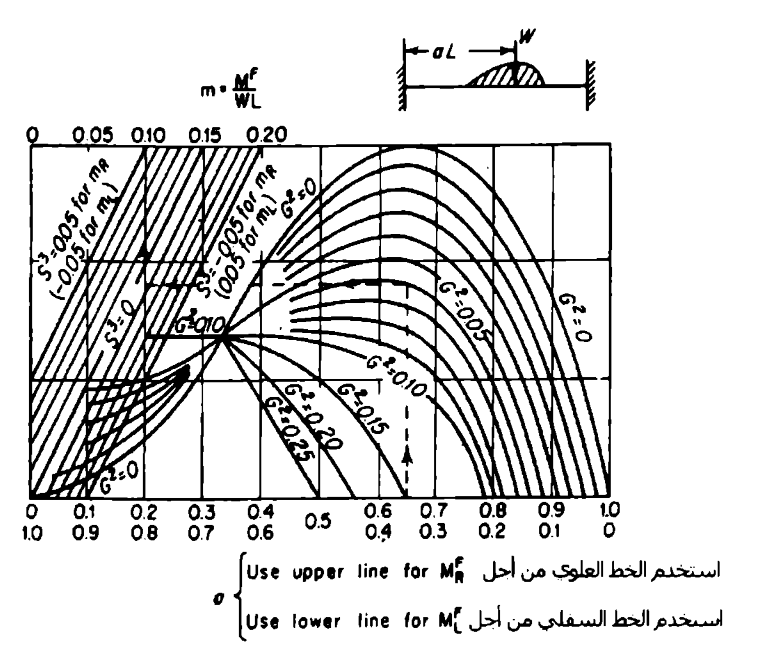
الشكل 2.6 عزوم الوثق لجائز موشوري.

(a) عزما الوثق من أجل حمولة مركزة.

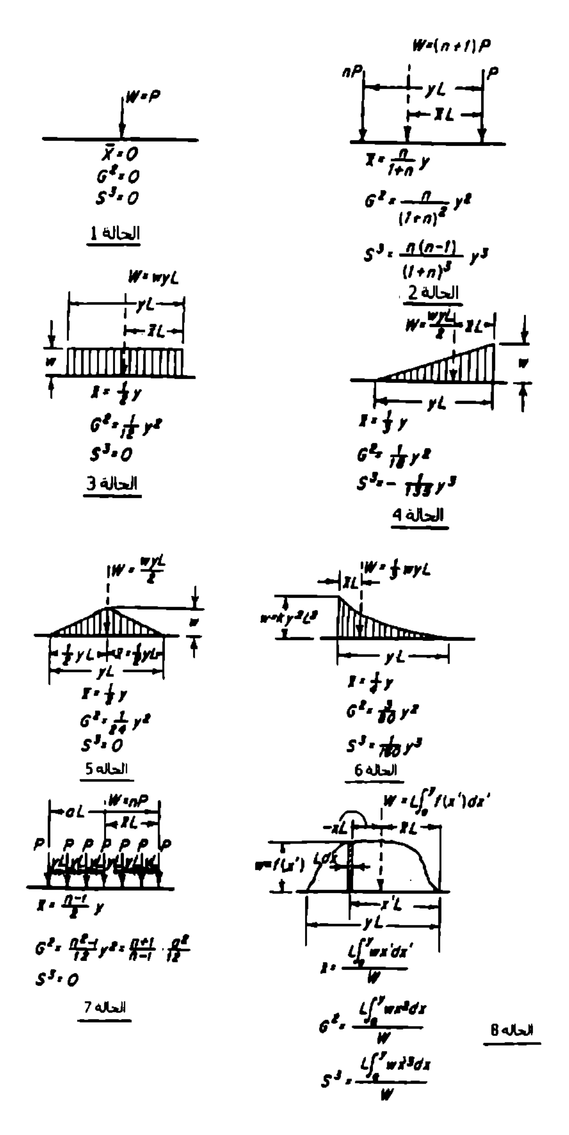
(b) عزما الوثق من أجل حمولة مستمرة منتظمة.

(c) عزما الوثق من أجل حمولتين متساويتين مركزتين.

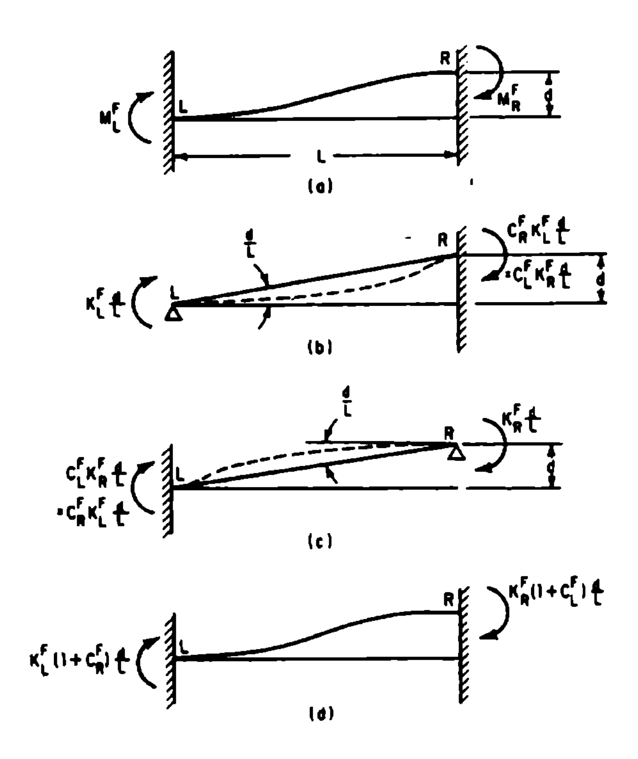
(d) عزما الوثق من أجل ثلاث حمولات متساوية مركزة.



الشكل 2.7 مخطط بياني خاص بحساب عزوم الوثق الناتجة عن أي نوع من التحميل.



الشكل 2.8 الصفات المميزة لآليات التحميل.



الشكل 2.9 العزوم الناشئة عن تشوهات جائز موثوق الطرفين.

المقاومة الحدية (القصوى) للجيزان المستمرة
Ultimate Strength Of Continuous Beams

إن طرق حساب المقاومة الحدية للجيزان المستمرة والأطر تعتمد على نظريتي تثبيت الحدود العلوية والدنيا لما يسمى قدرة استيعاب الحمولة أو السعة الحملية.

1. نظرية الحد العلوي: الحمولة المحسوبة بالاعتماد على آلية انهيار مفترضة، أكبر دائماً من الحمولة الحدية القصوى وفي أحسن الأحوال تساويها.

2. نظرية الحد الأدنى: الحمولة المقابلة أو الموافقة لشرط التوازن المُعطى بقيم افتراضية لا على التعيين للمجاهيل الفائضة، هي حمولة أصغر من الحمولة الحدية وفي أحسن الأحوال تساويها، شرط ألّا تتجاوز العزوم في أي مكان من الجائز العزم M_P.

طريقة التوازن التي تعتمد على نظرية الحد الأدنى، سهلة الاستخدام عادة من أجل الحالات البسيطة.

في الجائز المستمر الموضح في الشكل 2.10، نلاحظ أن نسبة العزم اللدن الموجود في نهايتي المجاز الوسطي إلى العزم في مركز هذا المجاز، هي k مرة $(k > 1)$.

يُبيّن الشكل 2.10b، مخطط العزم للجائز المقرر عن طريق تجاهل العزمين في B وC ومخطط العزم للجائز المقرر المطبق عليه العزمان M_B وM_C.

إذن، باستعانة الشكل 2.10C يتم الحفاظ على التوازن عندما:

$$M_P = \frac{wL^2}{4} - \frac{1}{2}M_B - \frac{1}{2}M_C$$

$$= \frac{wL^2}{4 - kM_P}$$

$$= \frac{wL^2}{4(1+k)} \qquad (2.4)$$

يمكن استخدام طريقة الآلية في تحليل الأطر التي تمتلك مقطعاً ثابتاً وقواعداً موثوقة، كما هو مبيّن في الشكل 2.11. وباستخدام هذه الطريقة، على إطار محمل بحمولة شاقولية في وسط مجازه الأفقي ومساوية إلى 1.5 مرة من الحمولة الطرفية المطبقة أفقياً عليه، تكون الحمولة الحدية للإطار $4.8\ M_P/L$ أفقياً و$7.2\ M_P/L$ شاقولياً في وسط مجازه.

يحدث العزم الأعظمي في المجازين الداخليين AB وCD عندما:

$$x = \frac{L}{2} - \frac{M}{wL} \qquad (2.5)$$

أو إذا كان:

$M = k\,M_P$ وذلك عندما $x = \frac{L}{2} - \frac{kM_P}{wL}$ ويتشكل المفصل اللدن في هذه المرحلة عندما يساوي العزم لـــ $k\,M_P$.

ومن أجل شرط التوازن:

$$kM_P = \frac{w}{2}x(L-x) - \frac{x}{L}kM_P$$

$$= \frac{w}{2}\left(\frac{L}{2} - \frac{kM_P}{wL}\right)\left(\frac{L}{2} + \frac{kM_P}{wL}\right) - \left(\frac{1}{2} - \frac{kM_P}{wL^2}\right)kM_P$$

وبإصلاحها تقودنا إلى:

$$\frac{k^2M_P^2}{wL^2} - 3kM_P + \frac{wL^2}{4} = 0 \qquad (2.7)$$

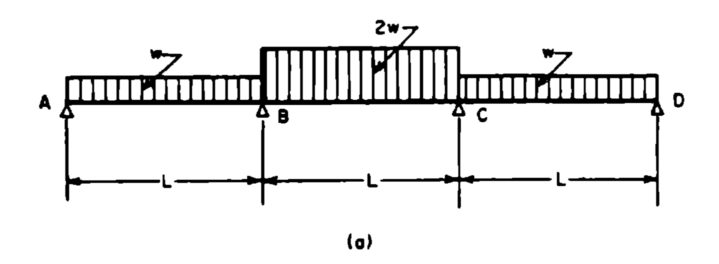
وعند تعويض قيمة M_P المحسوبة سابقاً، يصبح لدينا؛

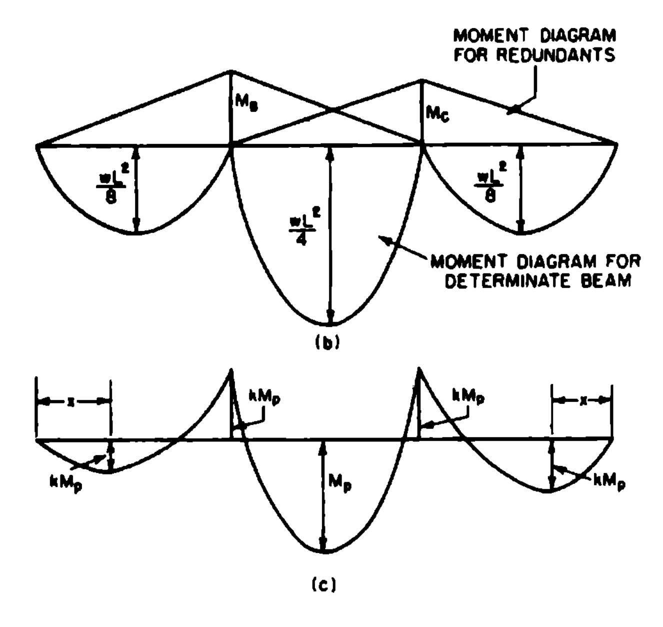
$K(K + 4/7) = 4/7$ أو $7\,K^2 + 4\,K = 4$

ومنها نجد؛ $K = 0.523$.

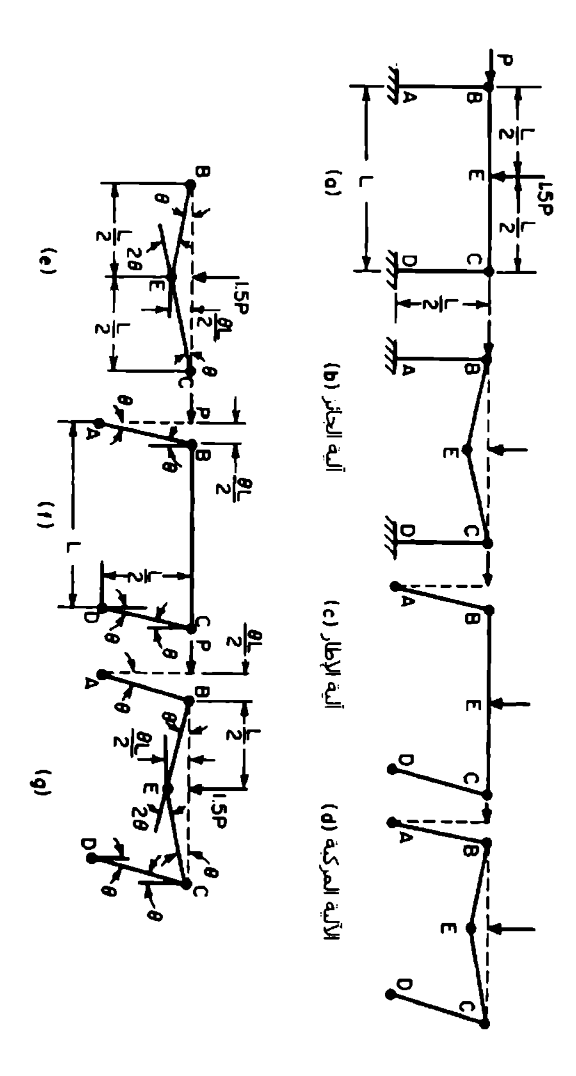
وتكون الحمولة الحدية:

$$wL = \frac{4M_P(1+K)}{L} = 6.1\frac{M_P}{L} \qquad (2.8)$$





الشكل 2.10 يُبيَّن في (a) جائز مستمر محمل بحمولة منتظمة في مجازه الوسطي أكبر بمرتين من الحمولة المنتظمة في مجازيه الجانبين. ويُبيَّن في (b) مخططا العزم من أجل شرط التحميل هذا، مرة بوجود المجاهيل الفائضة ومرة بدونها. في (c) تمّ ضم مخططيْ العزم، لإعطاء الحالات الحدية القصوى التي يفترض عندها أن تتشكل المفاصل اللدنة.

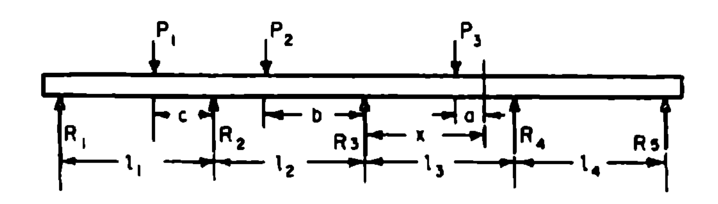


الشكل 2.11 احتمالات الحمولة الحدية لإطار صلب ذي مقطع ثابت وبقواعد موثوقة.

يساوي عزم الانعطاف في مقطع ما من أي جائز مستمر إلى عزم الانعطاف في أي مقطع ثانٍ زائد قوة القص في المقطع الثاني مضروبة بذراعها زائد ناتج ضرب جميع القوى الخارجية الموجودة بين النقطتين الأولى والثانية بأذرعها، مع الانتباه، أن لكل قوة ذراعها الخاص بها.

وهكذا، نجد في الشكل 2.12؛

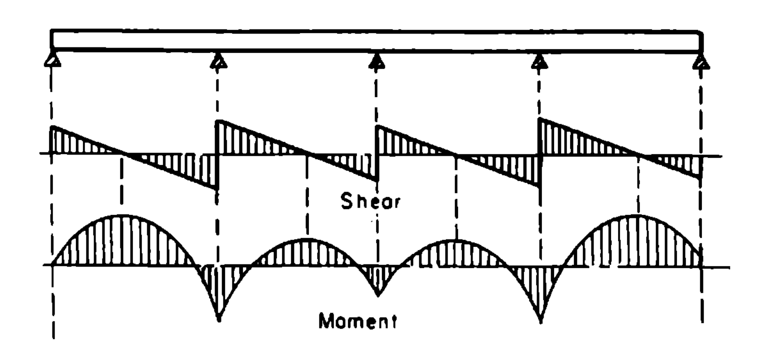
$$V_x = R_1 + R_2 + R_3 - P_1 - P_2 - P_3$$
$$M_x = R_1 (l_1 + l_2 + x) + R_2 (l_2 + x) + R_3 x - P_1 (l_2 + c + x) - P_2 (b + x) - P_3 a$$
$$M_x = M_3 + V_3 x - P_3 a$$



الشكل 2.12 جائز مستمر

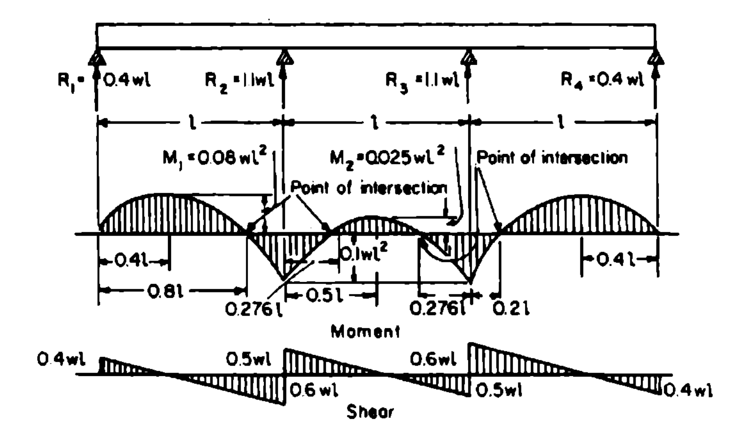
يعطي الجدول 2.1 قيمة العزم عند مساند مختلفة لجائز مستمر محمل بحمولة موزعة بانتظام على مجازات متساوية، كما ويعطي قيم قوى القص على كل جانب من جانبي كل مسند. لاحظ أن قوة القص من إشارتين مختلفتين على كل جانب من جانبي المسند وأن مجموع قوتي القص على جانبي المسند يساوي إلى رد الفعل.

يوضح الشكل 2.13 العلاقة بين مخططيْ العزم والقص في جائز مستمر مُحمّل بحمولة موزعة بانتظام بأربعة مجازات متساوية. (انظر الجدول 2.1)، فهذا الجدول 2.1 يعطي أيضاً عزم الانعطاف الأعظمي الذي يحدث بين المساند، بالإضافة إلى موقع هذا العزم ونقاط الانعطاف.



الشكل 2.13 العلاقة بين مخططي العزم والقص لجائز مستمر محمل بحمولة موزعة بانتظام ذي أربعة مجازات متساوية.

يُبيّن الشكل 2.14 قيم التوابع (عزوم الانعطاف وقوى القص) لجائز مستمر محمل بحمولة موزعة بانتظام يستند على أربعة مساند وبثلاثة مجازات متساوية.



الشكل 2.14 قيم تابعَيْ العزم والقص لجائز مستمر محمل بحمولة موزعة بانتظام يستند على أربعة مساند وبثلاثة مجازات متساوية.

الجدول 2.1 جيزان مستمرة محملة بحمولة موزعة بانتظام على مجازات متساوية. *(W هي الحمولة المنتظمة بواحدة الطول؛ l = طول كل مجاز)*

عدد المساند	تسمية مسند المجاز	قوة القص على كل جانب من المسند يمين = R، يسار = L رد الفعل في أي مسند هو L + R		العزم فوق كل مسند	العزم الأعظمي في كل مجاز	المسافة إلى نقطة العزم الأعظمي مقاسة بدءاً من يمين المسند	المسافة إلى نقطة الإنعطاف مقاسة بدءاً من يمين المسند
		L	R				
2	1 or 2	0	1/2	0	0.125	0.500	None
3	1	0	3/8	0	0.0703	0.375	0.750
	2	5/8	5/8	1/8	0.0703	0.625	0.250
4	1	0	4/10	0	0.080	0.400	0.800
	2	6/10	5/10	1/10	0.025	0.500	0.276, 0.724
	1	0	11/28	0	0.0772	0.393	0.786
5	2	17/28	15/28	3/28	0.0364	0.536	0.266, 0.806
	3	13/28	13/28	2/28	0.0364	0.464	0.194, 0.734
	1	0	15/38	0	0.0779	0.395	0.789
6	2	23/38	20/38	4/38	0.0332	0.526	0.268, 0.783
	3	18/38	19/38	3/38	0.0461	0.500	0.196, 0.804
	1	0	41/104	0	0.0777	0.394	0.788
	2	63/104	55/104	11/104	0.0340	0.533	0.268, 0.790

عدد المساند	تسمية مسند المجاز	قوة القص على كل جانب من المسند يمين = R، يسار = L رد الفعل في أي مسند هو L + R		العزم فوق كل مسند	العزم الأعظمي في كل مجاز	المسافة إلى نقطة العزم الأعظمي مقاسة بدءا من يمين المسند	المسافة إلى نقطة الانعطاف مقاسة بدءاً من يمين المسند
7	3	49/104	51/104	8/104	0.0433	0.490	0.196, 0.785
	4	53/104	53/104	9/104	0.0433	0.510	0.215, 0.804
	1	0	56/142	0	0.0778	0.394	0.789
8	2	86/142	75/142	15/142	0.0338	0.528	0.268, 0.788
	3	67/142	70/142	11/142	0.0440	0.493	0.196, 0.790
	4	72/142	71/142	12/142	0.0405	0.500	0.215, 0.785
تطبّق القيم على		w^l	w^l	wl^2	wl^2	l	l

القيم العددية المعطاة في هذا الجدول هي القيم العددية للتعابير (الرموز) الموجودة في أسفل كل عمود.

نظرية ماكسويل Maxwell's Theorem

عندما يُطبَّقُ عددٌ من الحمولات على جائز، فإن التشوّه في أي نقطة من الجائز يساوي إلى مجموع التشوهات، عند هذه النقطة، الناشئة عن تطبيق كل حمولة على نحو مستقل. إن نظرية ماكسويل تُحدِّد أنه إذا طبقت حمولتان واحديتان على جائز في نقطتين A وB، فإن التشوه في A الناتج عن واحدة الحمولة في B يساوي إلى التشوه في B الناتج عن واحدة الحمولة في A.

نظرية كاستيليانو Castigliano's Theorem

تُحدّد هذه النظرية أن التشوه في نقطة تطبيق قوة خارجية تفعل في جائز، يساوي إلى المشتق الجزئي، لعمل التحوّل، بالنسبة لهذه القوة. وهكذا، إذا كانت P القوة و f التحوّل وU عمل التحوّل، فالمشتق الجزئي يساوي قدرة أو طاقة المعاودة المرونية (الطاقة المرنة)

$$\frac{dU}{dP} = f$$

تبعاً لمبدأ العمل الأصغري، يحدث التحول لأي مُنشأ بطريقة يكون فيها عمل التحول أصغرياً.

الجيزان ذات المقاومة الموحدة Beams Of Uniform Strength

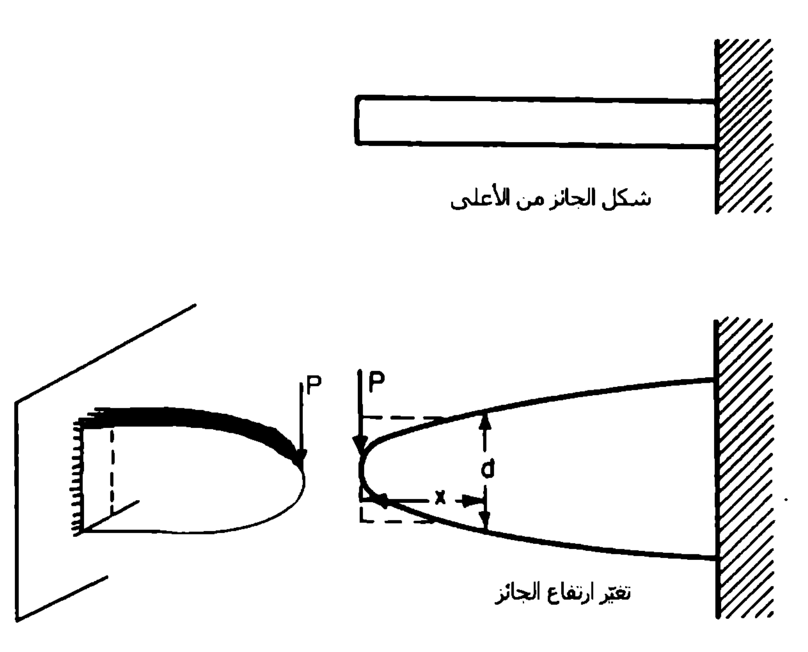
يتغيَّرُ كثيراً، في الجيزان ذات المقاومة الموحدة، مقطعها العرضي الذي تبقى فيه واحدة الإجهاد S ثابتة، بينما يتغيَّر كلٌّ من I/C وM فيه. ففي الجيزان التي لها مقطع عرضي مستطيل ذو عرض b وارتفاع d، يكون $I/C = bd^2/6$ و$M = Sbd^2/6$.

أما في الجائز الظفري الذي له مقطع عرضي مستطيل وواقع تحت تأثير الحمولة P، فيكون فيه $Px = Sbd^2/6$.

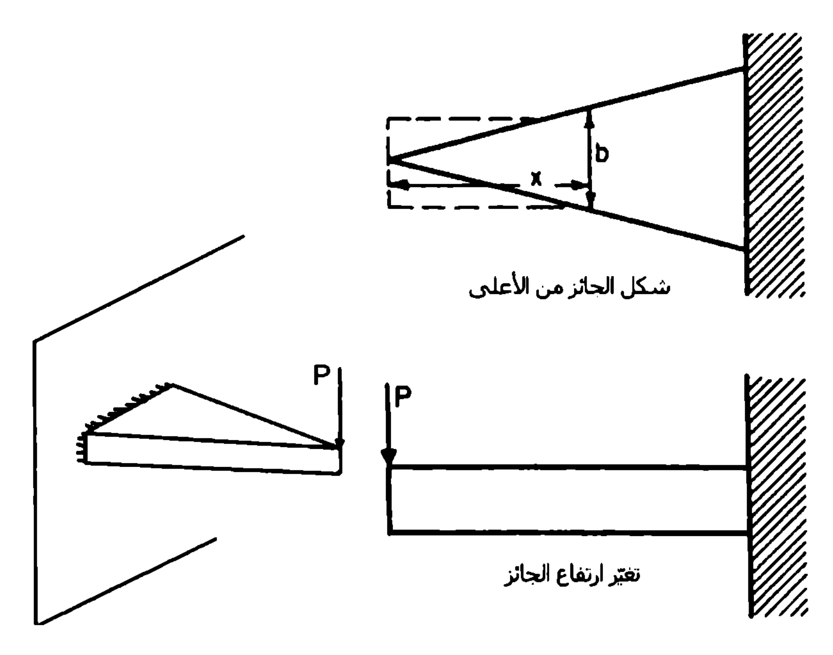
فإذا كانت b ثابتة، فإن d^2 تتغير مع تغيّر x (كعلاقة تابعية) مما يعني أن شكل المقطع الجانبي للجائز الظفري سيكون قطعاً مكافئاً، كما هو مبين في الشكل 2.15. وفي حال كانت d هي الثابتة، فهذا يعني أن b هي التي تتغير مع تغير x، وسيكون شكل الجائز الظفري من منظور علوي مثلثاً كما هو مبين في الشكل 2.16.

تتطلب قوة القص المؤثرة في نهاية الجائز تعديلاً للأشكال المُحدَّدة سابقاً. فالمساحة المطلوبة لمقاومة القص هي P/S_v في الظفر وR/S_v في الجائز البسيط.

تبين لنا الخطوط المنقطة في الشكلين 2.15 و2.16 التغيرات الضرورية المطلوبة لتمكين الجيزان الظفرية من مقاومة قوة القص.



الشكل 2.15 جائز على شكل قطع مكافئ ذو مقاومة موحّدة.



الشكل 2.16 جائز على شكل مثلث ذو مقاومة موحّدة.

ومهما يكن، تجعل عمليات التصنيع المكلفة والهدر في المواد، تجعل العديد من هذه الأشكال غير عملية مع استثناء الفولاذ الصلب (حديد الزهر). يبين الشكل 2.17 بعضاً من المقاطع البسيطة ذات المقاومة الموحّدة. وبطبيعة الحال، لم تؤخذ في أي شكل من هذه الأشكال قوة القص في الاعتبار.

1. جائز موثوق من طرف ومحمّل بحمولة مركزة من الطرف الآخر

الجائز	المقطع العرضي	شكلا تغير الارتفاع والعرض من منظور جانبي وعلوي	الصيغ
	مستطيل: العرض (b) ثابت التدلي (y) متحوّل	شكل تغيّر الارتفاع: 1. من الأعلى، خط مستقيم وفي الأسفل، قطع مكافئ 2. قطع مكافئ تام شكل تغيّر العرض: مستطيل	$y^2 = \frac{6P}{bS_s}x$ $h = \sqrt{\frac{6Pl}{bS_s}}$ التشوّه عند النقطة A: $f = \frac{8P}{bE}\left(\frac{l}{h}\right)^3$
	مستطيل: بعرض (y) متحوّل وتدلي (h) ثابت	شكل تغيّر الارتفاع: مستطيل شكل تغيّر العرض: مثلث	$y = \frac{6P}{h^2S_s}x$ $b = \frac{6Pl}{h^2S_s}$ التشوّه عند النقطة A: $f = \frac{6P}{bE}\left(\frac{l}{h}\right)^3$

الشكل 2.17 الجيزان ذات المقاومة الموحدة (بما يخص الانعطاف).

1. جائز موثوق من طرف ومحمّل بحمولة مركزة من الطرف الآخر

الجائز	المقطع العرضي	شكلا تغير الارتفاع والعرض من منظور جانبي وعلوي	الصيغ
	مستطيل: بعرض (z) متحوّل وتدلي (y) متحوّل وبنسبة $\frac{z}{y} = k$ ثابتة.	شكل تغيّر الارتفاع: قطع مكافئ مكعبي شكل تغير العرض: مقطع مكافئ مكعبي	$y^3 = \frac{6P}{kS_s}x$ $z = ky$ $h = \sqrt[3]{\frac{6Pl}{kS_s}}$ $b = kh$
	دائرة: بقطر (y) متحوّل	شكل تغيّر الارتفاع : قطع مكافئ مكعبي شكل تغيّر العرض: قطع مكافئ مكعبي	$y^3 = \frac{32P}{\pi S_s}x$ $d = \sqrt[3]{\frac{32Pl}{\pi Ss}}$

الشكل 2.17 /تابع/ الجيزان ذات المقاومة الموحدة (بما يخص الانعطاف).

1. جائز موثوق من طرف ومحمّل بحمولة مركزة من الطرف الآخر

الجائز	المقطع العرضي	شكلا تغير الارتفاع والعرض من منظور جانبي وعلوي	الصيغ
	مستطيل: بعرض (b) ثابت وتدلي (y) متحول	شكل تغير الارتفاع: مثلث شكل تغير العرض: مستطيل	$y = x\sqrt{\frac{3P}{blS}}$ $h = \sqrt{\frac{3Pl}{bS_s}}$ $f = 6\frac{P}{bE}\left(\frac{l}{h}\right)^3$
	مستطيل: بعرض (y) متحول وتدلي (h) ثابت	شكل تغير الارتفاع: مستطيل شكل تغير العرض: منحنيات على شكل قطع مكافئ يلتقيان بذروتيهما عند النهاية الطليقة .	$y = \frac{3Px^2}{lS_2h^2}$ $b = \frac{3Pl}{S_sh^2}$ التشوه عند النقطة A: $f = \frac{3P}{bE}\left(\frac{l}{h}\right)^3$

الشكل 2.17 الجيزان ذات المقاومة الموحدة (بما يخص الانعطاف) /تابع/.

1. جائز موثوق من طرف ومحمّل بحمولة مركزة من الطرف الآخر

الجائز	المقطع العرضي	شكلا تغير الارتفاع والعرض من منظور جانبي وعلوي	الصيغ
	مستطيل: بعرض (z) متحول وتدلي (y) متحول مع بنية $\frac{z}{y}=k$	شكل تغيّر الارتفاع: قطع مكافئ نصف مكعبي شكل تغير العرض: قطع مكافئ نصف مكعبي	$y^3 = \frac{3Px^2}{kS_s l}$ $z = ky$ $h = \sqrt[3]{\frac{3Pl}{kS_s}}$ $b = kh$

2. جائز موثوق النهاية ومحمل بحمولة p موزعة بانتظام على مجازه l.

الجائز	المقطع العرضي	شكلا تغير الارتفاع والعرض من منظور جانبي وعلوي	الصيغ
	دائرة: بقطر (y) متحول	شكل تغير الارتفاع: قطع مكافئ نصف مكعبي شكل تغير العرض: قطع مكافئ نصف مكعبي	$y^3 = \frac{16P}{\pi l S_s} x^2$ $d = \sqrt[3]{\frac{16Pl}{\pi S_s}}$

الشكل 2.17 /تابع/ الجيزان ذات المقاومة الموحدة (بما يخص الانعطاف).

3. جائز مسنود من طرفيه ومحمل بحمولة مركزة عند النقطة C

الجائز	المقطع العرضي	شكلا تغير الارتفاع والعرض من منظور جانبي وعلوي	الصيغ
	مستطيل: بعرض (b) ثابت وتدلي (y) متحول	شكل تغير الارتفاع: قطعان مكافئان تقع ذروتهما عند نقطتي الاستناد. شكل تغير العرض: مستطيل	$y=\sqrt{\frac{3P}{S_s b}x}$ $h=\sqrt{\frac{3Pl}{2bS_s}}$ $f=\frac{P}{2Eb}\left(\frac{l}{h}\right)^3$
	مستطيل: بعرض (y) متحول وتدلي (h) ثابت	شكل تغير الارتفاع: مستطيل شكل تغير العرض: مثلثان، يقع رأساهما عند نقطتي الاستناد	$y=\frac{3P}{S_s h^2}x$ $b=\frac{3Pl}{2S_s h^2}$ $f=\frac{3Pl^3}{8Ebh^2}$

الشكل 2.17 /تابع/ الجيزان ذات المقاومة الموحدة (بما يخص الانعطاف).

3. جائز مسنود من طرفيه ومحمل بحمولة مركزة عند النقطة c

الجائز	المقطع العرضي	شكلا تغير الارتفاع والعرض من منظور جانبي وعلوي	الصيغ
	مستطيل: بعرض (b) ثابت وتدلي (y أو y_1) متحول	شكل تغير الارتفاع: قطعان مكافئان، تقع ذروتهما عند نقطتي الاستناد. شكل تغير العرض: مستطيل	$y^2 = \frac{6P(l-p)}{blS_s}x$ $y_1^2 = \frac{6Pp}{blS_s}x_1$ $h = \sqrt{\frac{6P(l-p)p}{blS_s}}$

3. جائز مسنود من طرفيه ومحمل بحمولة p متحركة عبر مجازه.

الجائز	المقطع العرضي	شكلا تغير الارتفاع والعرض من منظور جانبي وعلوي	الصيغ
	مستطيل: بعرض (b) ثابت وتدلي (y) متحول	شكل تغير الارتفاع: قطع ناقص l = المحور الرئيسي 2h = المحور الثانوي شكل تغير العرض: مستطيل	$\frac{x^2}{\left(\frac{l}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\frac{3Pl}{2bS_s}} = 1$ $h = \sqrt{\frac{3Pl}{2bS_s}}$

الشكل 2.17 /تابع/ الجيزان ذات المقاومة الموحدة (بما يخص الانعطاف).

4. حائز مسنود من طرفيه ومحمل بحمولة p موزعة بانتظام على مجازه L.

الجائز	المقطع العرضي	شكلا تغير الارتفاع والعرض من منظور جانبي وعلوي	الصيغ
	مستطيل: بعرض (b) ثابت وتدلي (y) متحول	شكل تغيرالارتفاع: قطع ناقص شكل تغير العرض: مستطيل	$\frac{x^2}{\left(\frac{l}{2}\right)^2}+\frac{y^2}{\frac{3Pl}{4bS_s}}=1$ $h=\sqrt{\frac{3Pl}{4bS_s}}$. التشوه عند النقطة 0 : $f=\frac{1}{64}\frac{Pl^3}{EI}$ $=\frac{3}{16}\frac{P}{bE}\left(\frac{l}{h}\right)^3$
	مستطيل: بعرض (y) متحوّل وتدلي (h) ثابت.	شكل تغيّر الارتفاع: مستطيل شكل تغير العرض: قطعان مكافئان تقع ذروتهما في وسط المجاز	$y=\frac{3P}{S_s h^2}\left(x-\frac{x^2}{l}\right)$ $b=\frac{3Pl}{4S_s h^2}$

الشكل 2.17 /تابع/ الجيزان ذات المقاومة الموحدة (بما يخص الانعطاف).

حمولات الأمان في جيزان ذات نماذج متنوعة.

Safe Loads For Beams Of Various Types

يعطي الجدول 2.2 صيغاً عددها 32، خاصة بحساب القيمة التقريبية لحمولات الأمان على جيزان فولاذية من مقاطع عرضية متنوعة وذلك من أجل إجهاد مسموح قيمته $16.000\ lb/in^2$ (110.3 MPa). قم باستخدام هذه الصيغ لتُقدِّر بصورة سريعة حمولة الأمان لأي جائز فولاذي تستخدمه في تصميمك.

أمّا الجدول 2.3 فيعطي العوامل (الأمثال العددية) المتعلقة بتصحيح القيم في الجدول 2.2 وذلك من أجل طرق استناد وتحميل متنوعة. وفي حال تمّ دمج الجدول 2.3 مع الجدول 2.2 فسوف تزودنا مجموعتا الصيغ بطرق مجدية وفعالة في إجراء الحسابات السريعة لحمولة الأمان وذلك في كل من المكتب والحقل.

الجدول 2.2 حمولات الأمان التقريبية المؤثرة على جيزان فولاذية بالباوند (kgf). *(الجيزان مسنودة من الطرفين: إجهاد الألياف المسموح على الفولاذ 16.000 lb/in² (1.127 kgf/cm²) (أساس الجدول) أما بما يخص الحديد، اختصر القيم المعطاة بالجدول عن طريق ضربها بـ* $\frac{1}{8}$)

شكل المقطع	حمولات الأمان العظمى، lb		التشوه، in	
	الحمولة مركزة في الوسط	الحمولة موزعة	الحمولة مركزة في الوسط	الحمولة موزعة
مستطيل مليء	$\frac{890AD}{L}$	$\frac{1,780AD}{L}$	$\frac{wL^3}{32AD^2}$	$\frac{wL^3}{52AD^2}$
مستطيل مجوّف	$\frac{890(AD - ad)}{L}$	$\frac{1,780(AD - ad)}{L}$	$\frac{wL^3}{32(AD^2 - ad^2)}$	$\frac{wL^3}{52(AD^2 - ad^2)}$
اسطوانة مليئة	$\frac{667AD}{L}$	$\frac{1,333AD}{L}$	$\frac{wL^3}{24AD^2}$	$\frac{wL^3}{38AD^2}$
اسطوانة مجوّفة	$\frac{667(AD - ad)}{L}$	$\frac{1,333(AD - ad)}{L}$	$\frac{wL^3}{24(AD^2 - ad^2)}$	$\frac{wL^3}{38(AD^2 - ad^2)}$
زاوية مذيّلة بجناحين L أو مقطع بشكل حرف T	$\frac{885AD}{L}$	$\frac{1,770AD}{L}$	$\frac{wL^3}{32AD^2}$	$\frac{wL^3}{52AD^2}$
مقطع قناة U أو Z - bar	$\frac{1,525AD}{L}$	$\frac{3,050AD}{L}$	$\frac{wL^3}{53AD^2}$	$\frac{wL^3}{85AD^2}$

الجدول 2.2 */تابع/* حمولات الأمان التقريبية المؤثرة على جيزان فولاذية بالباوند (kgf). *(الجيزان مسنودة من الطرفين: إجهاد الألياف المسموح على الفولاذ 16.000 lb/in² (1.127 kgf/cm²) (أساس الجدول) أما بما يخص الحديد، اختصر القيم المعطاة بالجدول عن طريق ضربها بـ $\frac{1}{8}$)*

شكل المقطع	حمولات الأمان العظمى، lb		التشوه، in	
	الحمولة مركزة في الوسط	الحمولة موزعة	الحمولة مركزة في الوسط	الحمولة موزعة
مقطع الجائز ذو المسطبة	$\frac{1,380AD}{L}$	$\frac{2,760AD}{L}$	$\frac{wL^3}{50AD^2}$	$\frac{wL^3}{80AD^2}$
مقطع الجائز ذو الشكل I	$\frac{1,795AD}{L}$	$\frac{3,390AD}{L}$	$\frac{wL^3}{58AD^2}$	$\frac{wL^3}{93AD^2}$

L = المسافة بين المساند، ft (m). A = مساحة مقطع الجائز، in² (cm²). D = تدلي الجائز، in (cm).

a = المساحة الداخلية، in² (cm²). d = التدلي الداخلي ، in (cm) . w = حمولة التشغيل الإجمالية، بالطن الأميركي net tons (kgf).

الجدول 2.3 الأمثال الخاصة بتصحيح القيم الواردة في الجدول 2.2 من أجل طرق تحميل واستناد مختلفة.

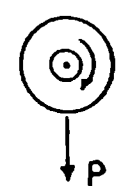
شروط التحميل	حمولة الأمان النسبية العظمى	التشوه النسبي الأعظمي تحت تأثير حمولة الأمان النسبية العظمى
جائز مسنود من طرفيه		•
حمولة موزعة بانتظام على المجاز	1.0	1.0
حمولة مركزة في وسط المجاز	1/2	0.80
حمولتان مركزتان بصورة تناظرية ومتساويتان	1/4c	
حمولة تتزايد بصورة منتظمة بدءاً من طرف نحو الطرف الآخر	0.974	0.976
حمولة تتزايد بصورة منتظمة نحو وسط المجاز	3/4	0.96
حمولة تتناقص بصورة منتظمة نحو وسط المجاز	3/2	1.08
جائز موثوق من إحدى نهايتيه، ظفر		
حمولة موزعة بانتظام على المجاز	1/4	2.40
حمولة مركزة في النهاية الطليقة.	1/8	3.20
حمولة تتزايد بانتظام نحو النهاية الموثوقة	3/8	1.92

الجدول 2.3 /تابع/ الأمثال الخاصة بتصحيح القيم الواردة في الجدول 2.2 من أجل طرق تحميل واستناد مختلفة.

شروط التحميل	حمولة الأمان النسبية العظمى	التشوه النسبي الأعظمي تحت تأثير حمولة الأمان النسبية العظمى
جائز مستمر على مسندين متساويي البعد عن طرفيه الظفريين		
حمولة موزعة بانتظام على الجاز		
1. if distance a > 0.2071 l	$l^2/4a^2$	
2. if distance a < 0.2071 l	$l/(l - 4a)$	
3. if distance a = 0.2071 l	5.83	
حمولتان متساويتان مركزتان عند النهايتين	$l/4a$	

l = طول الجائز . C = المسافة من المسند إلى أقرب حمولة مركزة منه. a = المسافة من المسند إلى نهاية الجائز

Rolling And Moving Loads الحمولات الدوارة المتحركة



الحمولات الدوارة والمتحركة هي الحمولات التي يمكنها أن تغير موقعها على جائز أو على عدة جيزان.

يوضح الشكل 2.18 جائزاً محملاً بحمولتين متساويتين مركزتين متحركتين، كالعجلتين المتحركتين على عارضة (جائز) المرفاع Crane - أو كعجلات الشاحنة المتحركة فوق جسر، مثلاً.

بما أن عزم الانعطاف الأعظمي يحدث عندما تكون قوة القص مساويةً للصفر، فيمكن لمخطط قوة القص إذن أن يبيّن الأماكن التي يحدث عندها العزم الأعظمي الناتج عن تأثير حمولة عجلة ما. وهكذا، بأخذ $x < a/2$:

$$R_1 = p\left(1 - \frac{2x}{l} + \frac{a}{l}\right)$$

$$M_2 = \frac{pl}{2}\left(1 - \frac{a}{l} + \frac{2x}{l}\frac{a}{l} - \frac{4x^2}{l^2}\right)$$

$$R_2 = p\left(1 + \frac{2x}{l} - \frac{a}{l}\right)$$

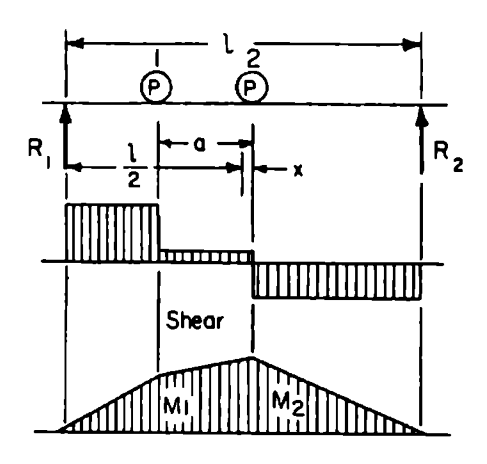
$$M_1 = \frac{pl}{2}\left(1 - \frac{a}{l} - \frac{2a^2}{l^2} + \frac{2x}{l}\frac{3a}{l} - \frac{4x^2}{l^2}\right)$$

$$a\frac{1}{4} = x \text{ عندما } \leftarrow M_2 = M_{max}$$

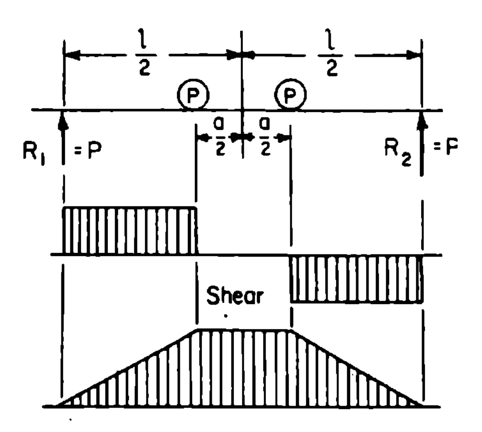
$$a\frac{3}{4} = x \text{ عندما } \leftarrow M_1 = M_{max}$$

$$M_{max} = \frac{Pl}{2}\left(1 - \frac{a}{2l}\right)^2 = \frac{Pl}{2l}\left(1 - \frac{a}{2}\right)^2$$

يوضح الشكل 2.19 الحالة التي تكون فيها الحمولتان المتساويتان متساويتي المسافة من طرفي وسط الجائز. بالتالي يكون العزم متساوياً تحت تأثير هاتين الحمولتين.



الشكل 2.18 حمولتان متساويتان مركزتان متحركتان



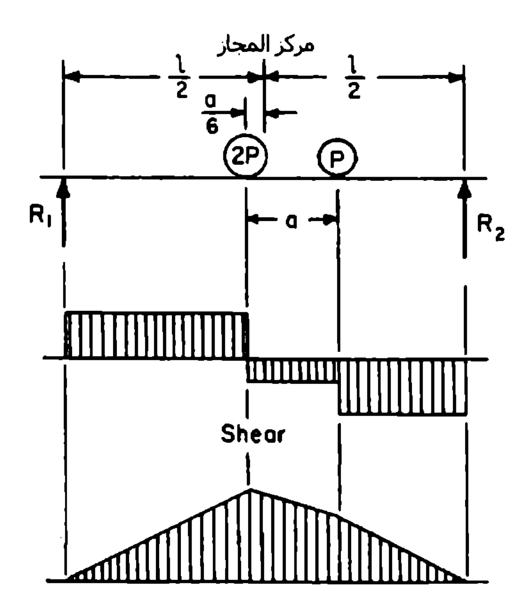
الشكل 2.19 حمولتان متساويتان متحركتان متساويتا البعد عن طرفي وسط الجائز.

في حال لم تكن الحمولتان متساويتي الوزن، فإن حالة حدوث العزم الأعظمي هي حالة العزم الأعظمي الذي يحدث نتيجة لتأثير العجلة الأثقل عندما يكون مركز

الجائز في حالة تنصيف للمسافة بين محصلة الحمولتين والعجلة الأثقل. يبين الشكل 2.20 هذه الوضعية وكلاً من مخططي القص وعزم الانعطاف.

عندما تكون هناك عدة حمولات تؤلف نظام تحميل على جائز أو جيزان، فلا بد من اختيار العجلات كل واحدة بمفردها، وذلك لتعيين أي واحدة منها ستسبب العزم الأعظمي. ويكون الوضع المرتبط بحدوث العزم الأعظمي نتيجة لتأثير حمولة عجلة ما، كما حدد سابقاً، هو الوضع الذي يكون فيه مركز المجاز منصفاً للمسافة بين العجلة المختبرة ومحصلة كل الحمولات المتبقية على المجاز.

أما الوضع المتعلق بالقص الأعظمي عند المسند فهو الوضع الذي تهمّ فيه إحدى الحمولات بمغادرة المجاز.



الشكل 2.20 حمولتان متحركتان من وزنين مختلفين.

الجيزان المنحنية Curved Beams

إن تطبيق الصيغ المرونية، الخاصة بالجيزان المستقيمة على الجيزان المنحنية ستسفر عن نتائج خاطئة. فعندما تمتلك جميع "ألياف" العنصر الإنشائي نفس مركز الانحناء، سوف يوجد للحائز المنحني مركز مشترك (الشكل 2.21). وقد تمّ تعريف مثل هذه الجيزان بنظرية Winkler-Bach. وتكون قيمة الإجهاد في نقطة تبعد y واحدة بدءاً من المحور المركزي هي:

$$S = \frac{M}{AR}\left[1 + \frac{y}{Z(R+y)}\right]$$

M هو عزم الانعطاف. موجب عندما يعمل على زيادة الانحناء.

y موجبة عندما تقاس باتجاه الطرف المحدّب.

A هي مساحة المقطع العرضي. R هو نصف قطر المحور المركزي.

Z هي خاصية المقطع العرضي وتُعرف بـ :

$$Z = -\frac{1}{A}\int \frac{y}{R+y} dA$$

وقد أُعطيت التعابير التحليلية لـ Z من أجل مقاطع معينة في الجدول 2.4.

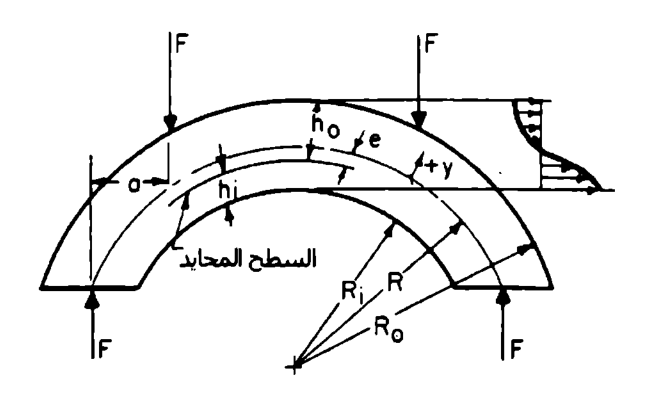
كما ويمكن إيجاد قيمة Z من طرق تكامل المنحني البياني (راجع أي كتاب متقدم في مقاومة المواد).

ينـزاح السطح المحايد نحو مركز الإنحناء أو نحو الأألياف الداخلية بمقدار يساوي إلى $e = ZR(Z+1)$.

الجدول 2.4 العبارات التحليلية لـــ Z

نوع المقطع	العبارات التحليلية
	$Z = -1 + \frac{R}{h}\left(\ln \frac{R+C}{R-C}\right)$
	$Z = -1 + 2\left(\frac{R}{r}\right)\left[\frac{R}{r} - \sqrt{\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 1}\right]$
	$Z = -1 + \frac{R}{A}[t \ln(R + C_1) + (b - t)\ln(R - C_0) - b\ln(R - C_2)]$ and $A = tC_1 - (b - t)C_3 + bC_2$
	$Z = -1 + \frac{R}{A}\left[b\ln\left(\frac{R+C_2}{R-C_2}\right) + (t-b)\ln\left(\frac{R+C_1}{R-C_1}\right)\right]$ $A = 2[(t-b)C_1 + bC_2]$

تهمل نظرية Winkler-Bach، على الرغم من تحققها عملياً، الإجهادات القطرية كما تهمل أيضاً التحولات الطرفية وتفترض إنعطافاً بحتاً. ويكون الإجهاد الأعظمي الذي يحدث في الليف الداخلي $S = Mh_i / AeR_i$، بينما يكون الإجهاد في الليف الخارجي $S = Mh_0/AeR_0$



الشكل 2.21 جائز منحني

يمكن حساب التشوّه في الجيزان المنحنية عن طريق نظرية عزم المساحة.

وسيكون التشوه الناتج مساوياً إلى $\Delta_0 = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}$ وفق الاتجاه المحدد بـ $\tan\theta = \Delta_y/\Delta_x$ وكما ويمكن إيجاد التشوهات بطريقة أسهل عن طريق نظرية كاستيليانو ـ Castigliano's theorem. فهذه النظرية تحدد أنه في منظومة مرنة تكون الإزاحة وفق اتجاه القوة (أو المزدوجة) والناتجة عن تطبيق تلك القوة (أو المزدوجة) هي المشتق الجزئي لطاقة الانفعال بالنسبة للقوة (أو المزدوجة).

فلو أخذنا جائزاً منحنياً على شكل ربع دائرة بنصف قطر R موثوقاً من إحدى نهايتيه كما هو موضح في الشكل 2.22. وطبقنا قوة F في النهاية الطليقة B وفق الاتجاه القطري، فسوف يكون التشوه في النقطة B:

I) عن طريق عزم المساحة

$y = R\sin\theta \quad x = R(1 - \cos\theta)$

$ds = Rd\theta \quad M = FR\sin\theta$

$${}_B\Delta_x = \frac{\pi FR^3}{4EI} \qquad {}_B\Delta_y = \frac{FR^3}{2EI}$$

وتكون Δ_B،

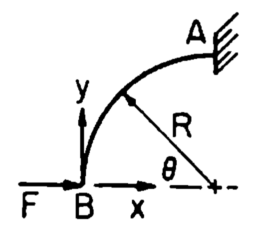
$$\Delta_B = \frac{FR^3}{2EI}\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{4}}$$

وعند،

$$\theta_x = \tan^{-1}\left(-\frac{FR^3}{2EI} \times \frac{4EI}{\pi FR^3}\right)$$
$$= \tan^{-1}\frac{2}{\pi}$$
$$= 32.5^\circ$$

II) عن طريق نظرية كاستيليانو - Castigliano's theorem

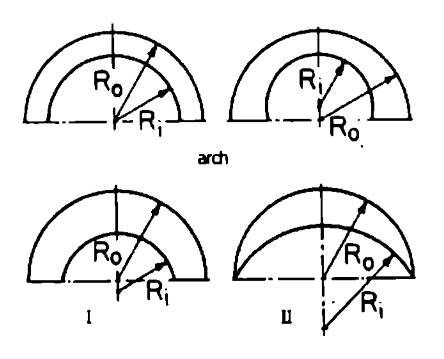
$${}_B\Delta_x = \frac{\pi FR^3}{4EI} \qquad {}_B\Delta_y = -\frac{FR^3}{2EI}$$



الشكل 2.22 جائز على شكل ربع دائرة موثوق من إحدى نهايتيه.

الجيزان المنحنية على نحو لا تمركزي Eccentrically Curved Beams

يحاط هذا النوع من الجيزان (الشكل 2.23) بقوسين لهما مركزا انحناء مختلفان. كما ويمكن أن يكون لأحد القطرين طول مختلف عن القطر الآخر. الجائز الذي يختصر فيه تدلي (عمق) المقطع بتقريبه إلى المقطع الوسطي يمكن تسميته بالجائز القوسي arch beam.



الشكل 2.23 الجيزان المنحنية اللاتمركزية.

وعندما يتحوّل المقطع الوسطي ليصبح أعظمياً، يكون الجائز من النوع الهلالي.

يرمز الهلال I إلى جائز ذي نصف قطر خارجي أكبر من الداخلي ويرمز الهلال II إلى جائز ذي نصف قطر داخلي أكبر من الخارجي. يمكن إيجاد الإجهاد في المقطع الوسطي لمثل هذا النوع من الجيزان من؛ $S = KMC/I$.

وفي حال كان المقطع العرضي مستطيلاً، تصبح المعادلة؛ $S = 6\ KM/bh^2$، حيث M هو عزم الانعطاف، b عرض مقطع الجائز، h ارتفاع المقطع.

عوامل الإجهاد، K خاصة بالحد الداخلي من المقطع، التي تمّ تثبيتها من قبل بيانات الخصائص المرونية المعتمدة على عملية التصوير أُعطيت في الجدول 2.5.

الجدول 2.5 عوامل الإجهاد الخاصة بالحد الداخلي في المقطع الوسطي. *(انظر الشكل 2.23)*

---

1. للحيزان من النوع القوسي

$$(a)\ K = 0.834 + 1.504\frac{h}{R_o + R_i}\ \text{if}\ \frac{R_o + R_i}{h} < 5$$

$$(b)\ K = 0.899 + 1.181\frac{h}{R_o + R_i}\ \text{if}\ 5 < \frac{R_o + R_i}{h} < 10$$

(c) في حالة نسبة المقطع أكبر، استخدم حل الجائز المكافئ

2. للحيزان من النموذج الهلالي I

$$(a)\ K = 0.570 + 1.536\frac{h}{R_o + R_i}\ \text{if}\ \frac{R_o + R_i}{h} < 2$$

$$(b)\ K = 0.959 + 0.769\frac{h}{R_o + R_i}\ \text{if}\ 2 < \frac{R_o + R_i}{h} < 20$$

$$(c)\ K = 1.092\left(\frac{h}{R_o + R_i}\right)^{0.0298}\ \text{if}\ \frac{R_o + R_i}{h} > 20$$

3. للحيزان من النموذج الهلالي II

$$(a)\ K = 0.897 + 1.098\frac{h}{R_o + R_i}\ \text{if}\ \frac{R_o + R_i}{h} < 8$$

$$(b)\ K = 1.119\left(\frac{h}{R_o + R_i}\right)^{0.0378}\ \text{if}\ 8 < \frac{R_o + R_i}{h} < 20$$

$$(c)\ K = 1.081\left(\frac{h}{R_o + R_i}\right)^{0.0270}\ \text{if}\ \frac{R_o + R_i}{h} > 20$$

يُرمز لنصف القطر الخارجي بـ R_0 وللداخلي بـ R_i. يُرتَّب الشكل الهندسي للحيزان الهلالية بحيث يمكن للإجهاد أن يكون أكبر بالابتعاد عن المقاطع الوسطية.

الإجهاد الذي تمّ تعيينه في المقطع الوسطي سابقاً لا بد أن يُضرب بعد ذلك بعامل الموضع k، المعطى في الجدول 2.6.

كما هو الحال في الجيزان المتمركزة، ينـــزاح السطح المحايد بمقدار ضئيل نحو الحد الداخلي. (انظر المرجع Vidosic, "Curved Beams with Eccentric Boundaries, Transactions of the ASME, 79, pp. 1317-1321).

الجدول 2.6 عوامل إجهاد الموضع في الجيزان الهلالية. (انظر الشكل 2.23*)

الزاوية θ بالدرجات	k داخلي	k خارجي
10	1 = 0.055 H/h	1 + 0.03 H/h
20	1 + 0.164 H/h	1 + 0.10 H/h
30	1 + 0.365 H/h	1 + 0.25 H/h
40	1 + 0.567 H/h	1 + 0.467 H/h
50	$1.521-\frac{(0.5171-1.382H/h)^{1/2}}{1.382}$	1 + 0.733 H/h
60	$1.756-\frac{(0.2416-0.6506H/h)^{1/2}}{0.6506}$	1 + 1.123 H/h
70	$2.070-\frac{(0.4817-1.298H/h)^{1/2}}{0.6492}$	1 + 1.70 H/h
80	$2.531-\frac{(0.2939-0.7084H/h)^{1/2}}{0.3542}$	1 + 2.383 H/h
90		1 + 3.933 H/h

ملاحظة: جميع الصيغ محققة من أجل $0<H/h \le 0.325$.

الصيغ الخاصة بالحد الداخلي، ما عدا الحالة التي توافق الزاوية و04 درجة، يمكن استخدامها من أجل $H/h \le 0.36$.

حيث H = المسافة بين المركزين

الانعطاف (التحنيب) المرن الجانبي للجيزان

Elastic Lateral Buckling Of Beams

عندما يحدث التحنيب الجانبي في جائز، يكتسب تركيباً مؤلفاً من فتل وانعطاف خارج مستوي تأثير القوى (الشكل 2.24). فمن أجل جائز مستند استناداً بسيطاً وله مقطع عرضي مستطيل خاضع لانعطاف منتظم، يحدث التحنيب عند عزم الانعطاف الحرج ويعطى بـــ :

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L}\sqrt{EI_y GJ}$$

حيث L = الطول اللا مقوى للعنصر.

E = معامل المرونة.

I_Y = عزم العطالة حول المحور الثانوي.

G = معامل مرونة القص.

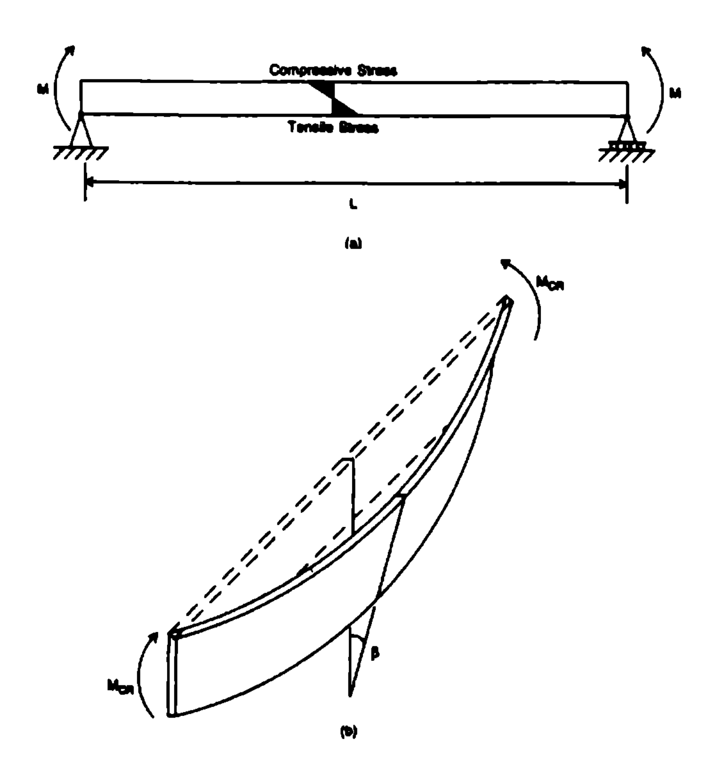
J = ثابت الفتل.

إن العزم الحرج يتناسب مع كل من قساوة (صلابة) الانعطاف الجانبية EIy/L وقساوة الفتل للعنصر GJ/L.

من أجل حالة المقطع المفتوح مثل الجيزان ذات المقطع I أو ذات الجناح العريض، يمكن لصلابة مقاومة الفتل للمقطع أن تعطي قساوة فتلية إضافية. تحنيب جائز مستند استناداً بسيطاً له مقطع عرضي مفتوح يخضع لانعطاف منتظم يحدث عند عزم الانعطاف الحرج، ويعطى بـــ

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L}\sqrt{EI_y\left(GJ + EC_w\frac{\pi^2}{L^2}\right)}$$

حيث؛ C_w ثابت الفتل وهو تابع لشكل المقطع العرضي ولأبعاده (شكل 2.25).



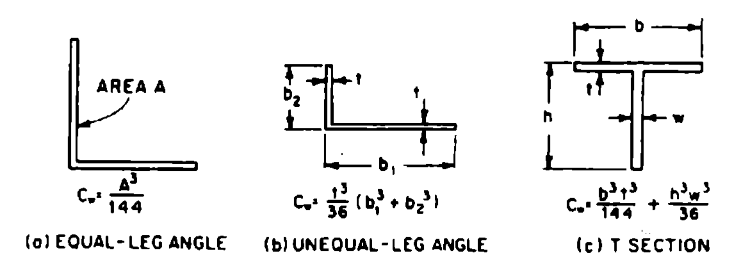
الشكل 2.24 (a) جائز بسيط خاضع لعزمين طرفيين متساويين
(b) التحنيب الجانبي المرن للجائز

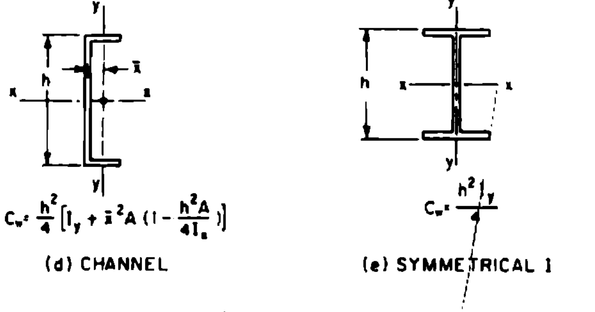
لقد تمّ فرض توزع عزم الانعطاف، في المعادلتين السابقتين، منتظماً. أما من أجل الحالة التي يكون فيها تدرج عزم الانعطاف غير منتظم، فغالباً ما يحدث التحنيب عند العزم الحرج الأعظم. والعزم التقريبي لعزم الانعطاف الحرج هذا M'_{cr} يمكن أن يتم الحصول عليه بجداء M_{cr} المعطى، في المعادلات السابقة، بعامل التكبير؛

$$M'_{cr} = C_b M_{cr}$$

حيث؛

$$C_b = \frac{12.5M_{max}}{2.5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C}$$





الشكل 2.25 ثوابت الفتل – الانعطاف من أجل التحنيب الفتلي.

A = مساحة المقطع العرضي. I_x = عزم العطالة حول المحور x - x.

I_y = عزم العطالة حول المحور y - y.

و

M_{max} = القيمة المطلقة للعزم الأعظمي في قطعة الجائز غير المقواة.

M_A = القيمة المطلقة للعزم عند نقطة الربع الأول لقطعة الجائز غير المقواة.

M_B = القيمة المطلقة للعزم عند النقطة الوسطى لقطعة الجائز غير المقواة.

M_c = القيمة المطلقة للعزم عند نقطة الربع الثالث من قطعة الجائز غير المقواة.

C_b تساوي إلى 1.0 من أجل الجيزان الظفرية غير المقواة ومن أجل العناصر الإنشائية حيث يكون العزم ضمن الجزء اللافت للانتباه من القطعة غير المقواة أكبر من أو يساوي إلى أكبر عزوم الوثق للقطعة.

الحمولات المحورية المركبة وحمولات الانعطاف

Combined Axial And Bending Loads

تُعطى الإجهادات، المتولدة في الجيزان القصيرة الخاضعة لحمولات محورية وعرضية، بالاعتماد على مبدأ تنضد الآثار وذلك إذا أمكن حذف التشوّه الناشئ عن الانعطاف دون خطأ يذكر. بمعنى أن الإجمالي يُعطى بدقة كافية في أي مقطع بجمع الإجهاد المحوري والإجهادات الناشئة عن الانعطاف.

الإجهاد الأعظمي lb/in^2 (MPa) يساوي إلى:

$$f = \frac{P}{A} + \frac{MC}{I}$$

حيث:

P = الحمولة المحورية، lb (N).

A = مساحة المقطع العرضي، in^2 (mm^2).

M = عزم الانعطاف الأعظمي، in lb (Nm).

C = المسافة من المحور المحايد إلى أبعد ليف في المقطع الذي يحدث فيه العزم الأعظمي، in (mm)

I = عزم العطالة حول المحور المحايد في المقطع المذكور سابقاً، in^4 (mm^4).

في حال كان التشوّه الناشئ عن الانعطاف كبيراً و لم يكن بالإمكان تجنّب إجهادات الانعطاف الناتجة عن الحمولات المحورية، فيعطى الإجهاد الأعظمي في هذه الحالة بالعلاقة:

$$f = \frac{P}{A} + (M + Pd)\frac{C}{I}$$

حيث: d تشوّه الجائز. وبما يخص الضغط المحوري لا بد أن يُعطى العزم Pd نفس إشارة M. أما بما يخص الشد فيعطى العزم Pd إشارة معاكسة، وتكون القيمة الصغرى (الدنيا) لـــ M + Pd مساوية للصفر.

التشوّه d العائد إلى الضغط المحوري والانعطاف يمكن أن يقرّب إلى حدٍّ دقيق بالعلاقة

$$d = \frac{d_o}{1 - (P/P_c)}$$

حيث: d_o = التشوه العائد إلى التحميل العرضي فقط، in (mm).

P_c = حمولة التحنيب الحرجة $\pi^2 EI/L^2$، lb (N).

الانعطاف اللاتناظري (مركّب) Unsymmetrical Bending

عندما يكون الجائز خاضعاً لحمولات لا تقع في المستوى الذي يحوي المحور الأساسي لكلٍ من المقطعين العرضيين، يحدث ما يسمى بالانعطاف اللا تناظري. بفرض أن محور انعطاف الجائز يقع في مستوي الحمولات، لمنع حدوث الفتل، وأن الحمولات عمودية على محور الانعطاف لمنع حدوث مركبات محورية، يكون الإجهاد lb/in^2 (Mpa) في أي نقطة من المقطع العرضي معطى بالعلاقة؛

$$f = \frac{M_x y}{Ix} + \frac{M_y x}{Iy}$$

حيث:

M_x = عزم الإنعطاف حول المحور الأساسي XX، in lb (Nm).

M_y = عزم الانعطاف حول المحور الأساسي YY، in lb (Nm).

x = المسافة من نقطة حساب الإجهاد إلى المحور YY، in (mm).

y = المسافة من النقطة إلى المحور XX، in (mm).

I_x = عزم عطالة المقطع العرضي حول المحور XX، in^4 (mm^4).

I_y = عزم العطالة حول المحور YY، in^4 (mm^4).

إذا كان مستوي الحمولات يصنع زاوية θ مع المستوي الأساسي، فسوف يشكّل السطح المحايد زاوية α مع المستوي الأساسي الأخر وبحيث يكون؛

$$\tan\alpha = \frac{I_x}{I_y}\tan\theta$$

التحميل اللاتمركزي Eccentric Loading

إذا ما طُبقّت حمولة لا تمركزية بالاتجاه الطولي على قضيب في مستوي التناظر، فسوف تؤدي إلى نشوء عزم انعطاف مقداره Pe، حيث e هي بعد الحمولة P عن المحور المركزي مقدرة بـــ in (mm) . ويكون إجهاد الواحدة الإجمالي هو مجموع هذا العزم والإجهاد الناشئ عن P وكأنها مطبقة كحمولة محورية:

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{Pec}{A} = \frac{P}{A}\left(1 \pm \frac{ec}{r^2}\right)$$

حيث: A = مساحة المقطع العرضي، in^2 (mm^2).

C = المسافة من المحور المحايد إلى أبعد ليف، in (mm).

I = عزم عطالة المقطع العرضي حول المحور المحايد، in^4 (mm^4).

r = نصف قطر الدوران أو العطالة = $\sqrt{\frac{A}{I}}$، in (mm).

يقدم الشكل 2.1 قيم نصف قطر الدوران لمقاطع عرضية مختلفة.

إن لم يكن هناك شدّ على المقطع العرضي تحت تأثير الحمولة الضاغطة، فيجب ألا تتجاوز e المقدار r^2/c. ومن أجل مقطع مستطيل بعرض b وتدلي d، يتوجب على اللاتمركزية، بناءً على ما سبق، أن تكون أقل من b/6 وd/6 (يعني، يجب ألاّ يتم تطبيق الحمولة خارج الثلث الأوسط) ومن أجل مقطع دائري بقطر D، يجب ألاّ تتجاوز اللا تمركزية المقدار D/8

عندما تؤدي الحمولة اللا تمركزية المطبقة بالاتجاه الطولي إلى نشوء تشوّه كبير جداً وقد تمّ حذفه في حساب إجهاد الانعطاف، لابد عندئذ من أخذ عزم الانعطاف الإضافي Pd بعين الاعتبار، حيث d التشوّه، in (mm) . يمكن تقريب هذا التشوه إلى حدٍّ دقيق بالعلاقة:

$$d = \frac{4eP/P_c}{\pi(1 - P/P_c)}$$

P_c هي حمولة التحنيب الحرجة π^2EI/L^2، lb (N)

إنْ لم تكن الحمولة P واقعة في المستوي الذي يحوي محور التناظر، ستنتج انعطافاً حول المحورين الأساسيين المارين من مركز ثقل المقطع. وتكون الإجهادات المقدرة بـــ lb/in^2 (MPa) معطاة بالعلاقة:

$$f = \frac{P}{A} + \frac{Pe_xC_x}{I_y} + \frac{Pe_yC_y}{I_x}$$

حيث: A = مساحة المقطع العرضي، in^2 (mm^2)

e_x = اللا تمركزية بالنسبة للمحور الأساسي YY، in (mm)

e_y = اللا تمركزية بالنسبة للمحور الأساسي XX، in (mm)

C_x = المسافة من المحور YY إلى أبعد ليف، in (mm)

C_y = المسافة من المحور XX إلى أبعد ليف، in (mm)

I_x = عزم العطالة حول المحور XX، in^4 (mm^4)

I_y = عزم العطالة حول المحور YY، in^4 (mm^4)

المحوران الأساسيان هما المحوران المتعامدان في مركز ثقل المقطع يكون من أجلهما عزما العطالة أعظميين أو أصغريين ويكون من أجلها أيضاً جداء العطالة مساوياً للصفر.

التواترات الدورية الطبيعية وفترات الاهتزاز الدورية الطبيعية للجيزان الموشورية.

Natural Circular Frequencies And Natural Periods Of Vibration Of Prismatic Beams

يوضح الشكل 2.26 الهيئة المميزة ويعطي الثوابت الخاصة بتعيين التواتر الدوري الطبيعي ω والفترة الدورية الطبيعية T وذلك من أجل النماذج الأربعة الأولى، للظفر وللجائز البسيط وللجائز الموثوق من الطرفين والموثوق من طرف والمتمفصل من الطرف الآخر.

لكي تحصل على ω، اختر الثابت المناسب من الشكل 2.26 ثم اضربه بالقيمة $\sqrt{EI/WL^4}$. ولكي تحصل على T، قسّم الثابت المناسب على القيمة $\sqrt{EI/WL^4}$.

في هذه العلاقات؛

ω = التواتر الطبيعي rad/s.

W = وزن الجائز، ليبرة بالقدم الطولي — lb per linear ft (أو kg per linear m).

L = طول الجائز، ft (m).

E = عامل المرونة، lb/in^2 (MPa).

I = عزم عطالة المقطع العرضي للجائز، in^4 (mm^4)

T = الفترة الدورية الطبيعية، s.

لتعيين الهيئات المميزة والفترات الدورية الطبيعية للجيزان ذات المقاطع العرضية المتغيرة وكذا الكتلة، استخدم طريقة - Rayleigh. حوّل الجائز إلى نظام كتلي مُجمّع عن طريق تقسيم المجاز إلى عناصر ثم افرض أنّ كتلة كل عنصر مركزة في مركزه. أيضاً قم بحساب جميع الكميات، مثل التشوه وعزم الانعطاف في مركز كل عنصر. ابدأ بهيئة مميزة افتراضية.

أنواع الاستناد	طريقة أولية	طريقة ثانية	طريقة ثالثة	طريقة رابعة
ظفر	L	0.774L	0.5L 0.132L	0.356L 0.094L 0.644L
$\omega\sqrt{wL^4/EI}$ =	20.0	125	350	684
$T\sqrt{EI/wL^4}$ =	0.315	0.0503	0.0180	0.0092
بسيط	L	0.5L	L/3 L/3	L/4 L/4 L/2
$\omega\sqrt{wL^4/EI}$ =	56.0	224	502	897
$T\sqrt{EI/wL^4}$ =	0.112	0.0281	0.0125	0.0070
وثاقة	L	L/2	0.359L 0.359L	0.278L L/2 0.278L
$\omega\sqrt{wL^4/EI}$ =	127	350	684	1,133
$T\sqrt{EI/wL^4}$ =	0.0496	0.0180	0.0092	0.0056
وثاقة - مفصل	L	0.56L	0.384L 0.308L	0.294L 0.235L 0.529L
$\omega\sqrt{wL^4/EI}$ =	87.2	283	591	1,111
$T\sqrt{EI/wL^4}$ =	0.0722	0.0222	0.0106	0.0062

الشكل 2.26 الأمثال العددية الخاصة بحساب التواترات الدورية الطبيعية وفترات الاهتزاز الطبيعية في الجيزان الموشورية.

3

صيغ الأعمدة

Column Formulas

اعتبارات عامة General Considerations

الأعمدة هي عناصر إنشائية خاضعة إلى ضغط مباشر. ويمكن أن تُحمل جميع الأعمدة ضمن الصفوف الثلاث التالية:

1. الأعمدة الكتلية الخاضعة للضغط وتكون قصيرة جداً (بأمثال نحافة - يعني، الطول اللا مسنود مقسوماً على نصف قطر الدوران* الأقصر للعنصر - دون 30) وانعطافها يحدث بدون فاعلية تذكر.
2. الأعمدة النحيفة جداً والتي لها انعطاف مفترض تحت تأثير الحمولة، تسمى أعمدة طويلة وتكون مُعَرفة بنظرية إيلر - Euler's theory
3. الأعمدة المتوسطة الطول، غالباً ما تستخدم في التطبيقات الإنشائية، تدعى بالأعمدة القصيرة.

تفشل الأعمدة الطويلة والقصيرة عادةً بالتصدي للتحنيب وذلك عندما تصل حمولاتها إلى الحمولة الحرجة. يتم تحليل الأعمدة الطويلة باستخدام صيغة العمود لإيلر - Euler يعني باستخدام:

$$P_{cr} = \frac{n\pi^2 EI}{l^2} = \frac{n\pi^2 EA}{(l/r)^2}$$

يُبيّن المثل العددي n في هذه الصيغة شروط النهاية. فعندما يكون العمود مستنداً إلى مرتكزين محوريين دورانيين في كلتا نهايتيه فإن n = 1. وعندما تكون إحدى نهايتيه موثوقة والأخرى دورانية فإن n = 2. وعندما تكون كلتا نهايتيه موثوقتين فإن n = 4 . أما عندما تكون إحدى نهايتيه موثوقة والنهاية الأخرى طليقة، فإن n = 0.25.

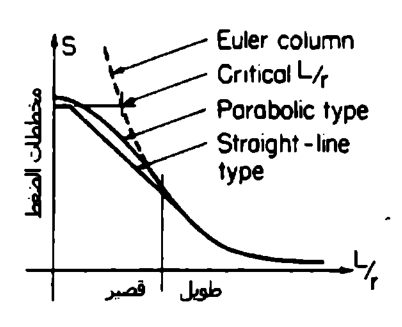
* نذكر مرة ثانية أن نصف قطر الدوران هو تعبير مكافئ لتعبير نصف قطر العطالة.

إن أمثال (مضاعفات) النحافة التي تفصل الجيزان الطويلة عن الجيزان القصيرة تعتمد على عامل المرونة ومقاومة الخضوع لمادة العمود. فعندما تؤدي صيغة إيلر إلى $(P_{cr}/A) > S_y$، ستتسبب مقاومة العمود (مقاومة غير كافية) بالانهيار عوضاً عن التحنيب وسيتوقف العمود عن التطاول أكثر من ذلك. في عملية التقدير السريعة للحسابات العددية، تقع أمثال النحافة الحرجة هذه، بين 120 و150. والجدول 3.1 يعطي معلومات إضافية عن العمود معتمدة على صيغة إيلر – Euler's Formula.

الأعمدة القصيرة Short Columns

يمكن اعتبار الإجهاد في الأعمدة القصيرة ناشئ جزئياً عن الضغط وجزئياً عن الانعطاف.

وبصورة تطبيقية، تعتمد العبارات المنطقية الخاصة بإجهادات العمود، عموماً، على فرضية أنّ الإجهاد المسموح يجب أن يخفّض دون تلك الإجهادات المسموحة الناشئة عن الضغط فقط. والطريقة التي يتم فيها هذا التخفيض أو الاختصار يعَين نوع المعادلة وأمثال النحافة التي لن تطبق بعدها المعادلة. يوضح لنا الشكل 3.1 المنحنيات العائدة إلى هذه الحالة. والصيغ النموذجية للعمود قد أعطيت في الجدول 3.2.



الشكل 3.1 المنحني البياني لــ L/r الخاص بالأعمدة.

الجدول 3.1 مقاومة الأعمدة ذات النهايات المفصلية الدوارة تبعاً لصيغة إيلر*

نوع المادة**	حديد الزهر	حديد مطاوع	فولاذ بنسبة كربون منخفضة	فولاذ بنسبة كربون متوسطة
lb/in^2، مقاومة الضغط الحدية (القصوى)	107,000	53,400	62,600	89,000
lb/in^2، إجهاد الضغط المسموح (الأعظمي)	7,100	15,400	17,000	20,000
عامل المرونة	14,200,000	28,400,000	30,600,000	31,300,000
عامل الأمان	8	5	5	5
أصغر I (عزم عطالة) مقبول في أخطر مقطع، in^4	pl^2	pl^2	pl^2	pl^2
	17,500,000	56,000,000	60,300,000	61,700,000
حدود النسبة، $<l/r$	50.0	60.6	59.4	55.6
مستطيل $\left(r = b\sqrt{1/12}\right)$، $<l/b$	14.4	17.5	17.2	16.0
دائرة $\left(r = \frac{1}{4}d\right)$، $<l/d$	12.5	15.2	14.9	13.9
حلقة دائرية ذات ثخانة صغيرة $\left(r = d\sqrt{1/8}\right)$، $<l/d$	17.6	21.4	21.1	19.7

* (p = الحمولة المقبولة (المسموحة)، lb. l = طول العمود، in. b = البعد الأصغر في المقطع المستطيل in. d = قطر المقطع الدائري، in. r= نصف قطر الدوران الأصغري للمقطع).

** لكي تتحول إلى نظام الوحدات الدولية SI استخدم $lb/in^2 \times 6.894 = kpa$ و $in^4 \times (25.4)^4 = mm^4$

الجدول 3.2 صيغ الأعمدة القصيرة النموذجية

الصيغة	نوع المادة	الكود	أمثال النحافة
$S_W = 17{,}000 - 0.485\left(\frac{l}{r}\right)^2$	Carbon steels	AISC	$\frac{l}{r} < 120$
$S_W = 16{,}000 - 70\left(\frac{l}{r}\right)$	Carbon steels	Chicago	$\frac{l}{r} < 120$
$S_W = 15{,}000 - 50\left(\frac{l}{r}\right)$	Carbon steels	AREA	$\frac{l}{r} < 150$
$S_W = 19{,}000 - 100\left(\frac{l}{r}\right)$	Carbon steels	Am.Br.Co	$60 < \frac{l}{r} < 120$
* $S_{cr} = 135{,}000 - \frac{15.9}{c}\left(\frac{l}{r}\right)^2$	Alloy-steel tubing	ANC	$\frac{l}{\sqrt{cr}} < 65$
$S_W = 9{,}000 - 40\left(\frac{l}{r}\right)$	Cast iron	NYC	$\frac{l}{r} < 70$
* $S_{cr} = 34{,}500 - \frac{245}{\sqrt{c}}\left(\frac{l}{r}\right)$	2017ST aluminum	ANC	$\frac{l}{\sqrt{cr}} < 94$
* $S_{cr} = 5{,}000 - \frac{0.5}{c}\left(\frac{l}{r}\right)^2$	Spruce	ANC	$\frac{l}{\sqrt{cr}} < 72$
* $S_{cr} = S_y\left[1 - \frac{S_y}{4n\pi^2 E}\left(\frac{l}{r}\right)^2\right]$	Steels	Johnson	$\frac{l}{r} < \sqrt{\frac{2n\pi^2 E}{S_y}}$
** $S_{cr} = \frac{S_y}{1 + \frac{ec}{r^2}\sec\left(\frac{l}{r}\sqrt{\frac{P}{4AE}}\right)}$	Steels	Secant	$\frac{l}{r} <$ critical

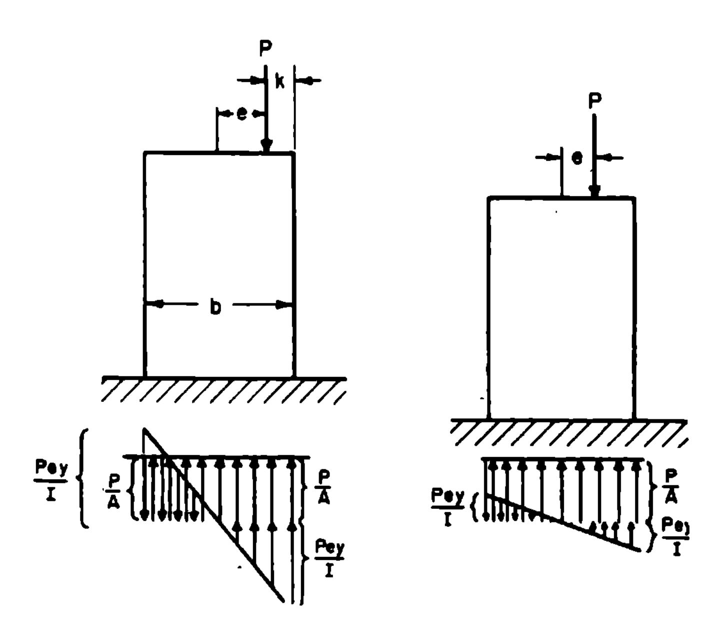
* S_{cr} = الإجهاد النظري الأعظمي. C = مُثل ثابتة (وثوقية) النهاية. C = 2، النهايتان مفصليتان. C = 2.86، نهاية مفصلية وأخرى موثوقة. C = 4، النهايتان موثوقتان. C = 1، نهاية موثوقة وأخرى حرة.

** e اللا مركزية الأولية التي تفصل بين نقطة تطبيق القوة ومركز ثقل المقطع العرضي للعمود.

الأعمدة الخاضعة لحمولات لا تمركزية

Eccentric Loads On Columns

عندما تتعرض الأعمدة القصيرة إلى حمولات مطبقة بصورة لا تمركزية سواء كانت ضاغطة أم شادة – أي غير مارة من مركز الثقل (cg)، ستنتج تركيباً مؤلفاً من إجهادات محورية وإجهادات انعطافية. وتكون واحدة الإجهاد العظمى S_M هي المجموع الجبري لواحدتي هذين الإجهادين.



الشكل 3.2 مخطط الحمولة المؤثرة على الأعمدة

الحمولة P في الشكل 3.2 تفعل في خط التناظر على مسافة e من مركز الثقل Cg.

r = نصف قطر الدوران. واحدتا الإجهادات هما: (1) Sc، ناتجة عن P، وكأنها فاعلة في مركز الثقل Cg، و(2) S_b ، ناتجة عن عزم الانعطاف لـ p التي تفعل بقدرة ذراعية e حول مركز الثقل cg. وهكذا، فإن واحدة الإجهاد S عند أي نقطة y هي:

$$S = S_c \pm S_b$$
$$= (P/A) \pm p\, e\, y/I$$
$$= S_c\,(1 \pm ey/r^2)$$

y موجبة من أجل النقاط الواقعة في نفس الجانب الذي تقع فيه P بالنسبة إلى مركز الثقل Cg، وسالبة في الجانب المقابل.

بما يخص المقطع العرضي المستطيل ذا العرض b، يكون الإجهاد الأعظمي؛ $S_M = S_c\,(1 + 6e/b)$.

عندما تقع P خارج الثلث الأوسط من العرض b وتكون حمولة ضاغطة، عندئذ تحدث إجهادات شادة.

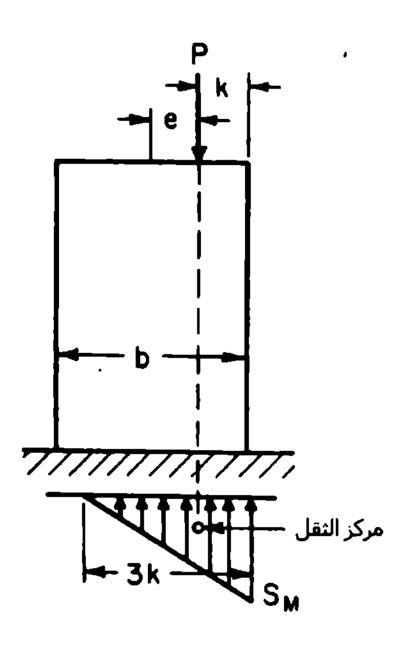
أمّا بما يخص المقطع الدائري بقطر d، يكون الإجهاد الأعظمي؛ $S_M = S_c\,(1 + 8e/d)$.

ويتطلب الإجهاد الناشئ عن وزن الجسم تعديلاً لهذه العلاقات.

لاحظ أن e في هذه الصيغ مقاسة بدءاً من المحور المار بمركز الثقل، وتعطينا إجهاداً شاداً عندما تكون e أكبر من سدس العرض (المقاس بنفس اتجاه e) بالنسبة للمقاطع المستطيلة وأكبر من ثمن القطر بالنسبة للمقاطع الدائرية المليئة.

إن لم تكن المادة قادرة على تحمل إجهادات شادة، كما هو الحال في أصناف معينة من المباني الحجرية، فلا بد من تجنب إمكانية حدوث قوة شادة، ويؤخذ مركز العزوم في هذه الحالة (شكل 3.3) في مركز الإجهاد. وبما يخص المقطع المستطيل تؤثر P على مسافة تبعد k عن الحافة الأقرب. ويكون الطول تحت تأثير الضغط = 3 k وتكون $S_M = 2/3\ P/hk$. وبما يخص المقطع الدائري:

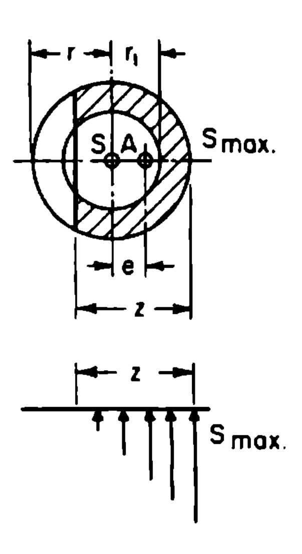
$S_M = [0.372 + 0.056(k/r)]\frac{P}{k}\sqrt{rk}$ ، حيث r = نصف القطر و k = بعد P عن محيط الدائرة.



الشكل 3.3 مخطط الحمولة للأعمدة.

وبالنسبة للحلقة الدائرية، S = إجهاد الضغط الوسطي على المقطع العرضي الناتج عن تأثير P. و e = لا تمركزية P. و z = طول القطر تحت تأثير الضغط (شكل 3.4).

قيم z/r وقيم النسبة S_{max} إلى S الوسطية، معطاة في الجدولين 3.3 و3.4.



الشكل 3.4 مخطط تأثير حمولة عمود دائري.

لب أو نواة المقطع هي المساحة التي تحيط بمركز ثقل المقطع العرضي والتي تُنتج الحمولة المطبقة ضمنها إجهاداً ذا إشارة واحدة فقط على كامل مساحة المقطع العرضي.

أما الحمولة المطبقة خارج هذه النواة، فتنتج إجهادات من إشارات مختلفة.

يوضح الشكل 3.5 النويات (مظللة) لعدة مقاطع مختلفة.

بالنسبة للحلقة الدائرية يكون نصف قطر النواة: $r = D\,[1 + (d/D)^2]/8$.

وبالنسبة للمربع المفرغ (H و h = طولا الضلعين الخارجي والداخلي) ، النواة هي مربع مشابه للشكل 3.5a، حيث

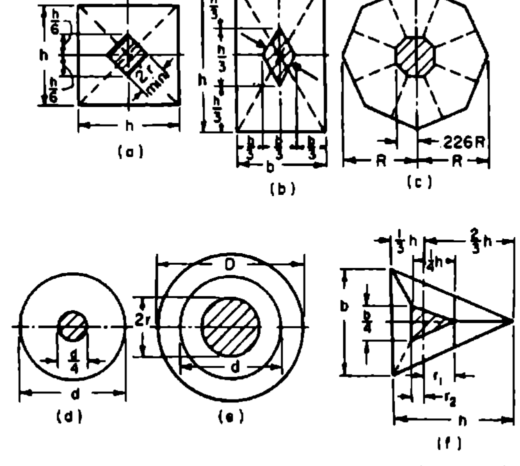
$$r_{min} = \frac{H}{6}\frac{1}{\sqrt{2}}\left[1+\left(\frac{h}{H}\right)^2\right] = 0.1179H\left[1+\left(\frac{h}{H}\right)^2\right]$$

الجدول 3.3 قيم النسبة z/r (انظر الشكل 3.5)

$\frac{e}{r}$	$\frac{r_1}{r}$ 0.0	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	$\frac{e}{r}$
0.25	2.00							0.25
0.30	1.82							0.30
0.35	1.66	1.89	1.98					0.35
0.40	1.51	1.75	1.84	1.93				0.40
0.45	1.37	1.61	1.71	1.81	1.90			0.45
0.50	1.23	1.46	1.56	1.66	1.78	1.89	2.00	0.50
0.55	1.10	1.29	1.39	1.50	1.62	1.74	1.87	0.55
0.60	0.97	1.12	1.21	1.32	1.45	1.58	1.71	0.60
0.65	0.84	0.94	1.02	1.13	1.25	1.40	1.54	0.65
0.70	0.72	0.75	0.82	0.93	1.05	1.20	1.35	0.70
0.75	0.59	0.60	0.64	0.72	0.85	0.99	1.15	0.75
0.80	0.47	0.47	0.48	0.52	0.61	0.77	0.94	0.80
0.85	0.35	0.35	0.35	0.36	0.42	0.55	0.72	0.85
0.90	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.32	0.49	0.90
0.95	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.25	0.95

الجدول 3.4 قيم النسبة S_{max}/S_{avg} *(في عملية تعيين S الوسطية، استخدم الحمولة P مقسومة على المساحة الإجمالية للمقطع العرضي)*

	$\frac{r_1}{r}$							
$\frac{e}{r}$	0.0	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	$\frac{e}{r}$
0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
0.05	1.20	1.16	1.15	1.13	1.12	1.11	1.10	0.05
0.10	1.40	1.32	1.29	1.27	1.24	1.22	1.20	0.10
0.15	1.60	1.48	1.44	1.40	1.37	1.33	1.30	0.15
0.20	1.80	1.64	1.59	1.54	1.49	1.44	1.40	0.20
0.25	2.00	1.80	1.73	1.67	1.61	1.55	1.50	0.25
0.30	2.23	1.96	1.88	1.81	1.73	1.66	1.60	0.30
0.35	2.48	2.12	2.04	1.94	1.85	1.77	1.70	0.35
0.40	2.76	2.29	2.20	2.07	1.98	1.88	1.80	0.40
0.45	3.11	2.51	2.39	2.23	2.10	1.99	1.90	0.45



الشكل 3.5 الصفات المميزة للعمود.

وبما يخص المثمّن المفرّغ، R_a وR_i = نصفا الدائرتين اللتين تحيطان بالأضلاع الخارجية والداخلية؛ ثخانة الجدار = $0.92399\ (R_a - R_i)$؛ والنواة هي مثمّن مشابه للشكل 3.5c، حيث $0.2256R$ تصبح $0.2256R_a\,[1 + (R_i/R_a)^2]$.

تصميم صفيحة (طبقة) قاعدة العمود

Column Base Plate Design

تستخدم عادة صفائح القاعدة لتوزيع حمولات العمود على مساحة كبيرة بشكل كاف من بيتون الإنشاء الداعم الذي لا تتجاوز مقاومة تحمل البيتون التصميمية مقاومته.

تُعتبر الحمولة المحللة Pu موزعة بانتظام تحت صفيحة القاعدة.

تعطى مقاومة تحمل البيتون الاسمية (الاعتبارية) f_p المقدرة بـ kip/in^2 أو ksi (MPa) بـ

$$f_p = 0.85 f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad \text{مع} \quad \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \le 2$$

حيث:

f'_c = مقاومة الضغط المميزة للبيتون، Ksi (Mpa).

A_1 = مساحة صفيحة القاعدة، in^2 (mm^2).

A_2 = مساحة البيتون الداعم المشابهة هندسياً للمساحة المُحمّلة والمتمركزة معها، in^2 (mm^2).

تساوي مقاومة تحمل البيتون f_p في معظم الحالات إلى $0.85\ f'_c$، وذلك عندما يكون المرتكز البيتوني أكبر بقليل من صفحة القاعدة أو تساوي إلى $1.7\ f'_c$ عندما يكون المرتكز قاعدة منبسطة أو وتداً ذا رأس عريض أو أساس حصيرة.

إذن. فالمساحة المطلوبة لصفيحة القاعدة من أجل الحمولة المحللة هي:

$$A_1 = \frac{P_u}{\phi_c 0.85f'_c}$$

حيث: ϕ_c هو عامل تخفيض المقاومة = 0.6.

بما يخص العمود المنتهي بجناح رأسي أو شفة بارزة (فلنجة – flange)، يجب على A_1 ألاّ تقل عن $b_f d$، حيث b_f عرض الجناح الرأسي مقدراً بـــ in (mm) و d عمق مقطع العمود مقدراً بـــ in (mm).

طول صفيحة القاعدة المستطيلة N، مقدراً بـــ in (mm)، العائد للعمود ذي الجناح، يمكن أن يؤخذ باتجاه d كما يلي:

$$N = \sqrt{A_1} + \Delta > d \qquad \text{or} \qquad \Delta = 0.5(0.95d - 0.80b_f)$$

أما العرض B، مقدراً بـــ in (mm)، الموازي للجناح (flanges)، سيكون:

$$B = \frac{A_1}{N}$$

ثخانة صفيحة القاعدة t_p، مقدرة بـــ in (mm)، هي أكبر القيم المعطاة بالعلاقات التالية:

$$t_p = m\sqrt{\frac{2P_u}{0.9F_y BN}}$$

$$t_p = n\sqrt{\frac{2P_u}{0.9F_y BN}}$$

$$t_p = \lambda n'\sqrt{\frac{2P_u}{0.9F_y BN}}$$

حيث:

m = مقدار بروز صفيحة القاعدة إلى ما بعد بروز جناح العمود، مأخوذاً بالاتجاه الموازي للجسد الواصل بين بروزي جناح العمود، مقدر بـ in (mm)، ويساوي
m = (N - 0.95d)/2

n = مقدار بروز صفيحة القاعدة ما بعد حواف الجناح مأخوذاً بالاتجاه الموازي للجسد، مقدراً بـ in (mm)، n = (B - 0.80bf)/2

$$n = \sqrt{(db_f)}/4$$

$$\lambda = (2\sqrt{x})/[1+\sqrt{(1-x)}] \le 1.0$$

$$X = [(4db_f)/(d+b_f)^2][P_u/(\phi \times 0.85f'_c A_1)]$$

طرق تصميم الإجهاد المسموح في فولاذ الإنشاء، العائدة للجمعية الوطنية الأمريكية

American Institute Of Steel Construction Allowable - Stress Design Approach

تُدعم أو تُسند الأعمدة السفلية للمنشأة، عادةً على أساس بيتوني. ويتم إيجاد المساحة المطلوبة، مقدرة بالإنشات المربعة (بالميليمترات المربعة)، من العلاقة:

$$A = \frac{P}{F_p}$$

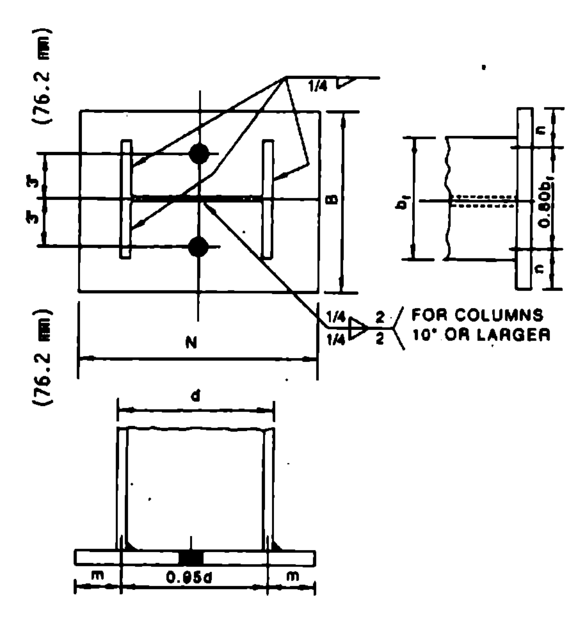
حيث: P الحمولة مقدرة بـ Kip (N). وF_p ضغط التحميل المسموح على المسند، مقدراً بـ Ksi (Mpa).

يعتمد الضغط المسموح على مقاومة البيتون في الأساس وعلى الأبعاد (القياسات) النسبية لصفيحة القاعدة وعلى مساحة المسند البيتوني. فإذا كانت صفيحة القاعدة تشغل مساحة المسند البيتوني بأكملها، فإن $F_p = 0.35 f_c'$،

حيث: f'_c هي مقاومة ضغط البيتون في اليوم 28. أما إذا كانت صفيحة القاعدة تغطي مساحة أقل من مساحة المسند البيتوني، فإن $F_p = 0.35f'_c\sqrt{A_2 / A_1} \le 0.70f'_c$ ، حيث: A_1 هي مساحة القاعدة $(B \times N)$ ، و A_2 هي كامل مساحة المسند البيتوني.

عدم تمركزية التحميل أو وجود عزم انعطاف في قاعدة العمود يزيد الضغط على بعض أجزاء صفيحة القاعدة وينقصه على بعض الأجزاء الأخرى. ولحساب هذه الإجهادات، يمكن افتراض أن صفيحة القاعدة صلبة تماماً بحيث يكون تغيّر الضغط على البيتون خطياً.

يمكن تعيين ثخانة الصفيحة عن طريق معالجة البروزين m و n لصفيحة القاعدة، الممتدين إلى ما بعد العمود، كظفرين.



الشكل 3.6 عمود ملحوم بصفيحة القاعدة.

يتم تحديد أبعاد الظفرين m و n، عادةً، كما هو موضّح في الشكل 3.6.

(وفي حال كانت صفيحة القاعدة صغيرة، فلا بد من معالجة مساحة صفيحة القاعدة الموجودة داخل بروفيل "مقطع" العمود كحائز).

يوضح تحليل منحني الخضوع أن بعد الظفر المكافئ n' يمكن أن يُحدّد بـ $n' = \frac{1}{4}\sqrt{db_f}$، وثخانة صفيحة القاعدة t_p المطلوبة يمكن أن تحسب من؛

$$t_p = 2l\sqrt{\frac{f_p}{f_y}}$$

حيث:

l = أكبر القيم (m، n، n')، مقدرة بـ in (mm)

$f_p = \frac{P}{B_N} \geq F_p$، Ksi (Mpa)

F_Y = مقاومة الخضوع لصفيحة القاعدة، Ksi (Mpa)

P = حمولة العمود المحورية، Kip (N)

بالنسبة للأعمدة الخاضعة لحمولة مباشرة فقط، يُطلب من لحامات العمود مع صفيحة القاعدة، كما هو موضح بالشكل 3.6، أن تتحمل بصورة أساسية إجهادات التشييد. أما بالنسبة للأعمدة الخاضعة إلى حمولات تتراكم من جرّاء الارتفاع في البناء، فيتوجب على اللحامات أن تكون متناسبة مع ذلك الارتفاع لكي تقاوم تأثير القوى.

Composite Columns الأعمدة المختلطة

عامل تصميم المقاومة والحمولة المميزة (LRFD) العائد للجمعية الوطنية الأميريكية للمنشآت الفولاذية (AISC) والمتعلق بأبنية الفولاذ الإنشائي، يتضمن إضافات تصميمية خاصة بعناصر الضغط المغلّفة أو المحاطة بالبيتون. فهو يُحدّد المتطلبات

التالية لكي تُمنح تلك العناصر صفة العمود المختلط: يجب أن تكون مساحة المقطع العرضي للقلب الفولاذي أو النواة الفولاذية ـــ المُحاط بأنبوب أو أنبوبي أو أشكال أخرى – على الأقل 4 بالمئة من المساحة الإجمالية المختلطة. ويجب أن يكون البيتون مسلحاً بقضبان طولانية تتصدى للحمولة، وتستمر بدون انقطاع عند موازين أخذ السوية المؤطّرة، وبأربطة جانبية وقضبان طولانية أخرى لحسر البيتون في القالب؛ حيث يجب أن يكون لجميع هذه القضبان غطاء بيتوني نظيف بمقدار $1\frac{1}{2}$ إنش (38.1 mm) على أقل تقدير. مساحة مقطع التسليح الطولاني والعرضاني يجب أن تكون على الأقل $0.007\ in^2$ ($4.5\ mm^2$) بالإنش (بالميليمتر) من التباعد بين القضبان. التباعد بين الأربطة يجب ألا يتجاوز ثلثي البعد الأصغر من المقطع المختلط. مقاومة البيتون f'_c يجب أن تقع بين 3 و8 Ksi (بين 20.7 و55.2 Mpa) من أجل بيتون ذي ثقل عادي ومقاومة 4 Ksi (27.6 Mpa) من أجل بيتون خفيف الوزن.

يجب ألا يتجاوز إجهاد الخضوع المُميّز الأصغري F_y للقلب الفولاذي والحديد التسليح المقدار 60 Ksi (414 Mpa). ثخانة جدار الأنبوب الفولاذي أو الأنبوب المملوء بمادة البيتون يجب أن تكون على الأقل $b\sqrt{F_y/3E}$ أو $D\sqrt{F_y/8E}$، حيث b هي عرض واجهة المقطع المستطيل، D هي القطر الخارجي للمقطع الدائري، E هي عامل مرونة الفولاذ.

يُعطي عامل تصميم المقاومة والحمولة (LRFD) العائد لـــ (AISC)، مقاومة التصميم وفق الشكل ϕP_n، من أجل عمود محمل محورياً، حيث: $\phi = 0.85$ وP_n معينة من:

$$\phi P_n = 0.85\ A_s\ F_{cr}$$

من أجل $\lambda \leq 1.5$

$$F_{cr} = 0.658^{\lambda_c^2}\ F_{my}$$

ومن أجل $\lambda_c > 1.5$

$$F_{cr} = \frac{0.877}{\lambda_c^2} F_{my}$$

حيث: $\lambda_c = (KL/r_m \pi)\sqrt{F_{my} / E_m}$

KL = الطول الفعّال للعمود، in (mm).

As = المساحة الخام للقلب الفولاذي بـ in^2 (mm^2).

$$F_{my} = F_y + c_1 F_{yr} (A_r/A_s) + c_2 f'_c (A_c/A_s)$$

$$E_m = E + c_3 E_c (A_c/A_s)$$

r_m = نصف قطر الدوران للقلب الفولاذي مقدراً بعدد من الإنشات، يحقق in ≥ 0.3 من الثخانة الكلية للمقطع العرضي المختلط في مستوى تحنيب الهياكل الفولاذية.

A_c = مساحة المقطع العرضي للبيتون، in^2 (mm^2).

A_r = مساحة التسليح الطولي، in^2 (mm^2).

E_c = عامل مرونة البيتون، Ksi (Mpa).

F_{yr} = إجهاد الخضوع المميز الأصغري للتسليح الطولاني، Ksi (Mpa).

بما يخص الأنابيب الفولاذية المملوءة بالبيتون والقضبان الفولاذية المحاطة بالأنابيب، يكون لدينا: $c_1 = 1.0$، $c_2 = 0.85$، $c_3 = 0.4$. أما بالنسبة للهياكل الفولاذية المغلفة بالبيتون فإن، $c_1 = 0.7$، $c_2 = 0.6$، $c_3 = 0.2$.

عندما يتألف اللُّب الفولاذي من هيكلين فولاذيين أو أكثر، فلابد لهذه الهياكل أن تكون مربوطة مع بعضها بقضبان ربط أو بصفائح ربط أو بصفائح على شكل سبائك رابطة لمنع تحنيب الهياكل المستقلة قبل أن تصل مقاومة البيتون إلى $0.75\ f'_c$.

إن جزءاً من المقاومة المطلوبة، الخاصة بالأعمدة المختلطة المغلفة والمحملة محورياً، التي يعبأ بها البيتون، يجب أن تتم زيادتها عن طريق التحميل المباشر عند الأربطة أو الوصلات القصية التي يمكن أن تستخدم لنقل الحمولة المطبقة بصورة مباشرة على البيتون إلى العمود الفولاذي. وتكون مقاومة التصميم للبيتون هي $1.7\ \phi_c\ f'_c\ A_b$ من أجل التحميل المباشر، حيث $\phi_c = 0.65$ وA_b = المساحة المحملة، in^2 (mm^2) كما وتطبق محظورات معينة أخرى.

التحنيب الانثنائي المرن للأعمدة
Elastic Flexural Buckling Of Columns

التحنيب المرن إن هو إلا حالة من حالات عدم الاستقرار الجانبي للعنصر، يحدث عندما تتعرض المادة إلى إجهاد يقترب من نقطة الخضوع. ويكتسب التحنيب أهمية خاصة في المنشآت ذات العناصر النحيفة. وتعطينا صيغة إيلر الخاصة بالأعمدةا المنتهية بمسندين مسماريين أو مفصليين (الشكل 3.7) نتائجاً صحيحة بالنسبة لحمولة التحنيب الحرجة، مقدرة بـــ Kip (N). وهذه الصيغة، بأمثال نحافة مُمثّلة بـــ L/r، هي:

$$P = \frac{\pi^2 EA}{(L/r)^2}$$

حيث:

E = عامل مرونة مادة العمود، Psi (Mpa).

A = مساحة المقطع العرضي للعمود، in^2 (mm^2).

r = نصف قطر الدوران للعمود، in (mm).

يوضح الشكل 3.8 بعض الشروط المثالية للنهايات الخاصة بالأعمدة النحيفة والمقابلة لحمولات التحنيب الحرجة. ويمكن أن يتم الحصول على حمولات التحنيب الحرجة من أجل جميع الحالات عن طريق تعويض الطول الفعّال KL بدلاً من الطول L للعمود المتمفصل، التي ستعطينا؛

$$P = \frac{\pi^2 EA}{(KL/r)^2}$$

في بعض الحالات المتعلقة بالأعمدة ذات المقاطع المفتوحة، مثل المقطع المتصالب، يمكن أن تكون طريقة إدارة التحنيب على أنها واحدة من طرق التحوّل الفتلي عوضاً عن التحوّل الجانبي. فإن لم يكن للصلابة الفتلية للمقطع أهمية تذكر، فإن التحنيب الفتلي في العمود المنتهي بمفصلين يحدث عند الحمولة المحورية:

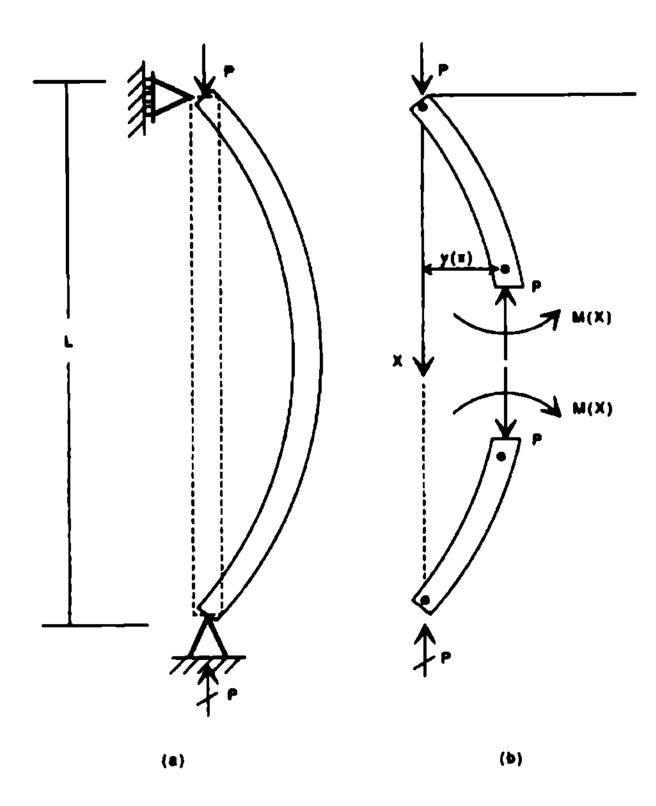
$$P = \frac{GJA}{IP}$$

حيث: G = عامل مرونة القص

J = ثابت الفتل

A = مساحة المقطع العرضي

Ip = عزم العطالة القطبي = $I_x + I_y$



الشكل 3.7 (a) تحنيب عمود متمفصل من النهايتين واقع تحت تأثير حمولة محورية.
(b) تبقى القوى الداخلية العمود في حالة توازن.

نوع العمود	الطول الفعّال	حمولة التحنيب الحرجة
	L	$\frac{\pi^2 EI}{L^2}$
	$\frac{L}{2}$	$\frac{4\pi^2 EI}{L^2}$
	≈ 0.7 L	$\approx \frac{2\pi^2 EI}{L^2}$
	2 L	$\frac{\pi^2 EI}{4L^2}$

الشكل 3.8 صيغ تحنيب الأعمدة.

أما في حال كان لمقطع العمود صلابة فتلية ذات قيمة معتبرة، فسوف تزداد حمولة التحنيب المحورية إلى:

$$P = \frac{A}{I_p}\left(GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{L^2}\right)$$

حيث، C_w: ثابت الفتل تابع لشكل المقطع العرضي وأبعاده.

حمولات التصميم المقبولة (المسموحة) الخاصة بأعمدة الألومينوم

Allowable Design Loads For Aluminum Columns

تُستخدم صيغة إيلر في أعمدة الألومينوم الطويلة. أمّا في الأعمدة القصيرة فتستخدم إمّا معادلة جونسون القطعية – Johnson's Parabolic equation أو معادلة الخط

المستقيم، وذلك بالاعتماد على نوعية مادة العمود. وتلك المعادلات الخاصة بالألومينوم تأتي من:

معادلة إيلر:

$$F_e = \frac{C\pi^2 E}{(L/\rho)^2}$$

معادلة جولنسون المعمَّمة:

$$F_c = F_{ce}\left[1 - K\left(\frac{(L/\rho)}{\pi\sqrt{\frac{cE}{F_{ce}}}}\right)^n\right]$$

يتم اختيار قيمة n، التي تُحدد إذا كانت صيغة العمود القصير هي معادلة الخط المستقيم أم هي المعادلة القطعية، من الجدول 3.5. مدى أو مجال الانتقال من العمود الطويل إلى العمود القصير يُعطى وفق:

$$\left(\frac{L}{\rho}\right)_{cr} = \pi\sqrt{\frac{kcE}{F_{ce}}}$$

حيث:

F_c = إجهاد الضغط المسموح على العمود.

F_{ce} = إجهاد خضوع العمود ويُعطى كتابع لـ F_{cy} (إجهاد خضوع الضغط).

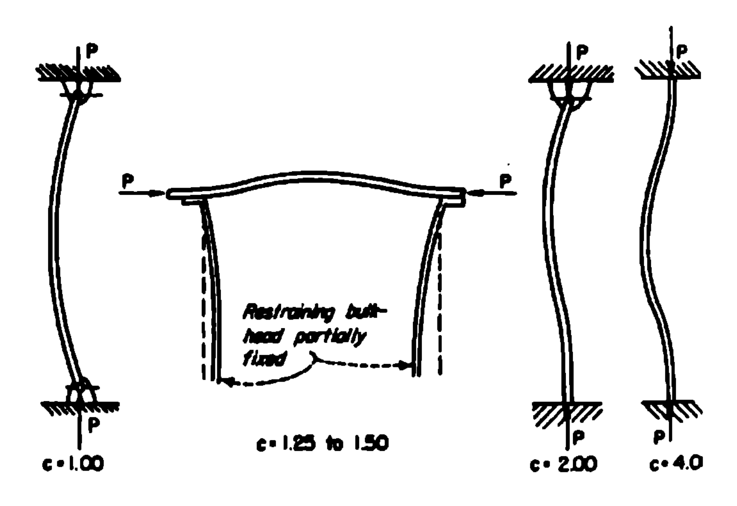
L = طول العمود.

ρ = نصف قطر دوران العمود.

E = عامل المرونة – الملاحظ على الرسم البياني.

c ثباتية أو وثوقيّة نهاية العمود، تؤخذ من الشكل 3.9.

n, K, k = ثوابت تؤخذ من الجدول 3.5.



الشكل 3.9 قيم c، الخاصة بثباتية نهاية العمود، من أجل تحديد النسبة الحرجة L/ρ لشروط تحميل مختلفة.

الجدول 3.5 ثوابت المادة الخاصة بسبائك أعمدة الألومنيوم.

نوع المادة	المعدّل الوسطي F_{cy}		القيم F_{cc}		K	k	n	نوع معادلة جونسون
	psi	MPa	psi	MPa				
14S-T4	34,000	234.4	39,800	274.4	0.385	3.00	1.0	Straight linc
24S-T3 and T4	40,000	275.8	48,000	330.9	0.385	3.00	1.0	Straight linc
61S-T6	35,000	241.3	41,100	283.4	0.385	3.00	1.0	Straight line
14S-T6	57,000	393.0	61,300	422.7	0.250	2.00	2.0	Squared parabolic
75S-T6	69,000	475.8	74,200	511.6	0.250	2.00	2.0	Squared parabolic

المرجع: ANC - 5

تصميم الأعمدة البيتونية بالمقاومة الحدية (القصوى)

Ultimate Strength Design Concrete Columns

عند الوصول إلى المقاومة الحدية P_u، Kip (N)، يفترض بالأعمدة أن تكون قادرة على تلقي الحمولات المطبقة فعلياً في نقاط لا تمركزية وذلك وفق معادلات المقاومة المطلوبة المعطاة في الفصل الخامس "صيغ البيتون" من قبل الجمعية الوطنية الأميريكية للبيتون. وقد لا تتجاوز P_u المقدار ϕP_n، حيث ϕ عامل تخفيض السعة الحملية وP_n، مقدرة بـ Kip (N)، المقاومة الحدية للعمود. في حال كانت P_o، مقدرة بـ Kip (N)، المقاومة الحدية للعمود المطبق عليه حمولة بلا تمركزية تساوي الصفر، فعندئذ تكون؛

$$P_o = 0.85\ f'_c\ (A_g - A_{st}) + f_y\ A_{st}$$

حيث:

f_y = مقاومة الخضوع لفولاذ التسليح، Ksi (Mpa).

f'_c = مقاومة الضغط في اليوم 28 للبيتون، Ksi (Mpa).

A_g = المساحة الخام للعمود، in^2 (mm^2).

A_{st} = مساحة فولاذ التسليح، in^2 (mm^2).

وبالنسبة للأعمدة المسلحة حلزونياً والمطبق عليها حمولات محورية فقط يكون:

$$P_u \le 0.85\ \phi\ P_o$$

وبالنسبة للأعمدة المسلحة بفولاذ مربوط ومحملة بحمولات محورية فقط يكون:

$$P_u \le 0.80\ P_o$$

تقاس نقاط تطبيق القوى اللا تمركزية اعتباراً من مركز الثقل اللدن.

مركز الثقل اللدن هذا، الذي يقاوم الحمولة، يُحسب على افتراض أنّ البيتون يتعرض لإجهاد على نحو منتظم من $0.85\ f'_c$ وأن الفولاذ يتعرض لإجهاد على نحو منتظم من f_y.

من الممكن أن يتم تحديد قدرة استيعاب الحمولة المحورية (السعة الحملية) P_u، مقدرة بـــ Kip (N)، للأعمدة القصيرة ذات المقطع المستطيل والخاضعة لحمولة محورية وانعطاف، من العلاقة:

$$\text{حمولة محورية } P_u = \phi\,(0.85\, f'_c\, ba + A'_s\, f_y - A_s\, f_s)$$

$$\text{عزم انعطاف } p_u e' = \phi\left[0.85 f'_c\, ba\left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_s\, f_y\,(d - d')\right]$$

حيث:

e' = اللا مركزية، in (mm)، للحمولة المحورية المطبقة في نهاية العمود، وذلك بالنسبة لمركز ثقل تسليح الشد، محسوبة وفق الطرق التقليدية في تحليل الهيكل الإنشائي.

b = عرض الوجه المضغوط، in (mm).

a = عمق توزّع إجهاد الضغط المكافئ، in (mm).

A'_s = مساحة التسليح المضغوط، in^2 (mm^2).

A_s = مساحة التسليح المشدود، in^2 (mm^2).

d = المسافة من أبعد سطح مضغوط إلى مركز ثقل التسليح المشدود، in (mm).

d' = المسافة من أبعد سطح مضغوط إلى مركز ثقل التسليح المضغوط، in (mm).

f_s = إجهاد الشد في الفولاذ، Ksi (Mpa).

تفترض المعادلتان السابقتان أن a لا تتجاوز عمق العمود وأن التسليح يكون في الوجه أو في الوجهين الموازيين لمحور الانعطاف وأن التسليح في أي وجه يقع على مسافة تساوي تقريباً نفس المسافة من محور الانعطاف.

في حال خضع فعلياً فولاذ الضغط عند المقاومة الحدية أم لم يخضع، كما هو مفترض في هذه المعادلات والمعادلات التالية، يمكن التحقق من صحة ذلك عن طريق حسابات الانفعال المتوافقة. بمعنى، أنه عندما ينكسر البيتون، لابد أن يكون الانفعال في فولاذ الضغط، 0.003 (c - d')/c، أكبر من ذلك الانفعال عندما يبدأ الفولاذ بالخضوع، f_y/E_s.

وفي هذه الحالة، c هي المسافة، مقدرة بـــ in (mm)، من أبعد سطح مضغوط إلى المحور المحايد وE_s عامل مرونة الفولاذ، مقدرة بـــ Ksi (Mpa). يمكن أن يتم حساب الحمولة P_b التي تحقق شروط التوازن، من معادلة P_u السابقة بعد أن نأخذ $f_s = f_y$ و

$$\begin{aligned} a &= a_b \\ &= \beta_1 c_b \\ &= \frac{87{,}000\beta_1 d}{87{,}000 + f_y} \end{aligned}$$

ويمكن أن يتم الحصول على عزم التوازن مقدراً بـــ in.Kip (k.Nm)، من:

$$\begin{aligned} M_p &= P_b e_b \\ &= \phi \left[\begin{aligned} &0.85 f'_c\, b a_b \left(d - d'' - \frac{a_b}{2} \right) \\ &+ A'_s f_y (d - d' - d'') + A_s f_y d'' \end{aligned} \right] \end{aligned}$$

حيث: e_b هي لا مركزية الحمولة المحورية، مقدرة بـــ in (mm)، بالنسبة لمركز الثقل اللدن. و"d هي المسافة، مقدرة in (mm)، من مركز الثقل اللدن إلى مركز ثقل تسليح الشد.

عندما تكون P_u أقل من P_b أو عندما تكون اللامركزية e أكبر من e_b، فالشد هو الذي يسيطر. وفي تلك الحالة التي يكون فيها تسليحي الشد والضغط غير متساويين، تكون المقاومة الحدية:

$$p_u = 0.85f'_c\, bd\phi \left\{ \begin{array}{l} \rho' m' - \rho m + \left(1 - \frac{e'}{d}\right) + \\ \sqrt{\left(1 - \frac{e'}{d}\right)^2 + 2\left[(\rho m - \rho' m')\frac{e'}{d} + \rho' m'\left(1 - \frac{d'}{d}\right)\right]} \end{array} \right\}$$

حيث:

$$m = f'_y / 0.85\ f'_c$$

$$m' = m - 1$$

$$\rho = A_s / bd$$

$$\rho' = A'_s / bd$$

حالات خاصة للتسليح

معادلة P_u السابقة من أجل تسليح متناظر في كلا الوجهين، تصبح:

$$P_u = 0.85f'_c\, bd\phi \left\{ \begin{array}{l} -\rho + 1 - \frac{e'}{d} \\ + \sqrt{\left(1 - \frac{e'}{d}\right)^2 + 2\rho\left[m'\left(1 - \frac{d'}{d}\right) + \frac{e'}{d}\right]} \end{array} \right\}$$

مقاومة العمود في حال كان الضغط هو المسيطر

معادلة P_u، دون وجود تسليح ضغط، تصبح:

$$P_u = 0.85f'_c\, bd\phi \left\{ \begin{array}{l} -\rho m + 1 - \frac{e'}{d} \\ + \sqrt{\left(1 - \frac{e'}{d}\right)^2 + 2\frac{e'\rho m}{d}} \end{array} \right\}$$

عندما تكون P_u أكبر من P_b، أو e أصغر من e_b، فإن الضغط هو المسيطر. وفي تلك الحالة، تكون المقاومة الحدية مساوية بصورة تقريبية:

$$P_u = P_o - (P_o - P_b)\frac{M_u}{M_b}$$

$$P_u = \frac{P_o}{1 + (P_o / P_b - 1)(e / e_b)}$$

حيث، M_u هي قدرة استيعاب العزم (السعة العزمية) تحت تأثير تركيب مؤلف من حمولة محورية وانعطاف مقدراً بـــ Kip in (KNm) و P_o هي قدرة استيعاب الحمولة المحورية (السعة المحلية المحورية) مقدرة بـــ Kip (N) للعنصر عندما يُحمّل بصورة تمركزية وفق ما هو معطى.

من أجل تسليح متناظر أُحادي الطبقة في كل جانب، يمكن أن تحسب المقاومة الحدية، عندما يكون الضغط هو المسيطر في عمود ذي عمق h، من:

$$P_u = \phi\left(\frac{A'_s f_y}{e/d - d' + 0.5} + \frac{bhf'_c}{3he/d^2 + 1.18}\right)$$

الأعمدة الدائرية

يمكن أن يتم تعيين المقاومة الحدية للأعمدة الدائريّة القصيرة، المزودة بقضبان تسليح دائرية المقطع، من المعادلات التالية:

عندما يسيطر الشد:

$$P_u = 0.85f'_c D^2\phi\left[\sqrt{\left(\frac{0.85e}{D} - 0.38\right)^2 + \frac{\rho_t m D_s}{2.5D}} - \left(\frac{0.85e}{D} - 0.38\right)\right]$$

حيث:

D = القطر الإجمالي للمقطع، in (mm).

D_s = قطر دائرة التسليح، in (mm)

$\rho_t = A_{st}/A_g$

وعندما يكون الضغط هو المسيطر:

$$P_u = \phi\left[\frac{A_{st} f_y}{3e/D_s + 1} + \frac{A_g f'_c}{9.6De/(0.8D + 0.67D_s)^2 + 1.18}\right]$$

وتُعطى اللا تمركزية الخاصة بشرط التوازن بصورة تقريبية وفق:

$$e_b = (0.24 - 0.39\, \rho_t\, m)\, D$$

الأعمدة القصيرة

يمكن أن يتم تعيين المقاومة الحدّية للأعمدة القصيرة المربعة ذات العمق h والمزودة بقضبان تسليح دائرية المقطع، من المعادلات التالية:

عندما يكون الشد هو المسيطر:

$$P_u = 0.85bhf'_c\,\phi\left[\sqrt{\left(\frac{e}{h} - 0.5\right)^2 + 0.67\frac{D_s}{h}\rho_t m} - \left(\frac{e}{h} - 0.5\right)\right]$$

وعندما يكون الضغط هو المسيطر:

$$P_u = \phi\left[\frac{A_{st} f_y}{3e/D_s + 1} + \frac{A_g f'_c}{12he/(h + 0.67D_s)^2 + 1.18}\right]$$

الأعمدة النحيفة

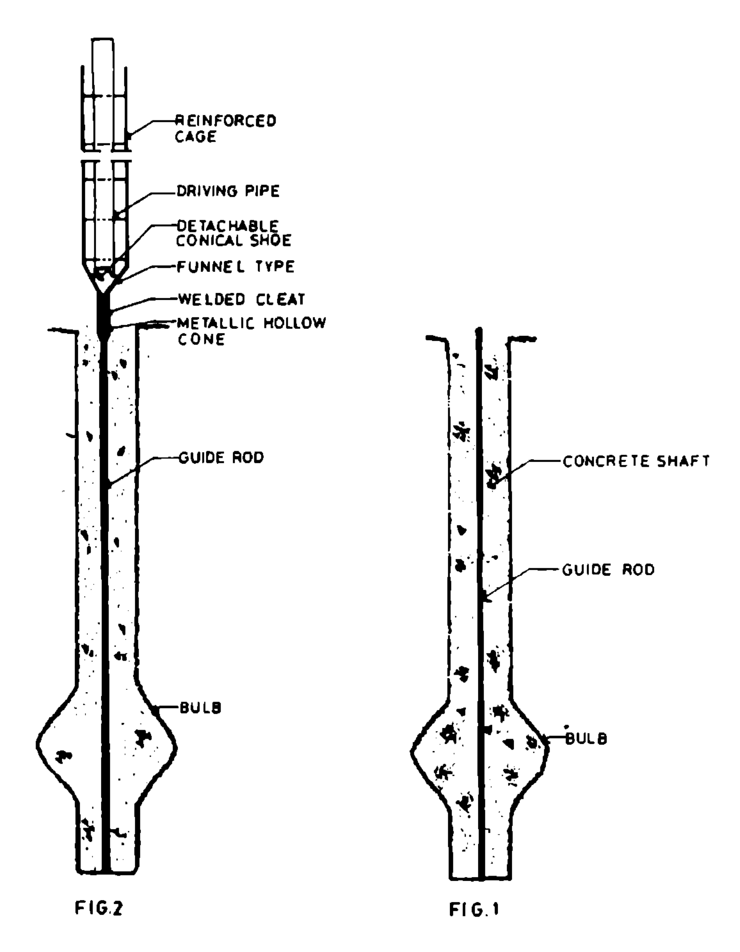
عندما يتوجب أخذ نحافة العمود بعين الاعتبار، فلابد أن يتم تعيين اللا تمركزية من، $e = M_c/P_u$. حيث: M_c العزم المكبّر.

4

الصيغ الخاصة بالأوتاد
وعموم أنواع الأوتاد الأرضية

Piles And Piling Formulas

نبدأ هذا الفصل بسرد بعض الأشكال التوضيحية عن الأوتاد.



مراحل سبر وتد

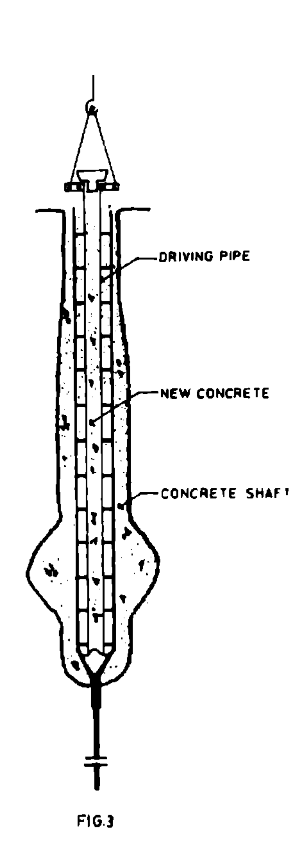


FIG.3

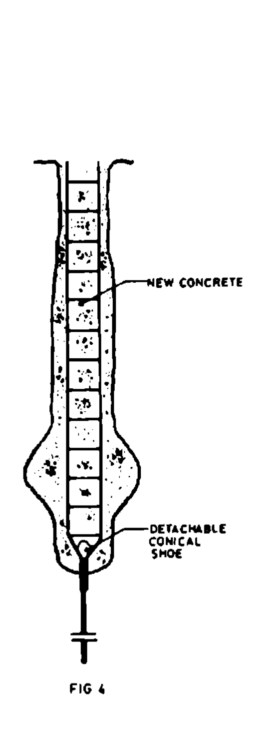


FIG 4

/تابع/ مراحل سبر وتد

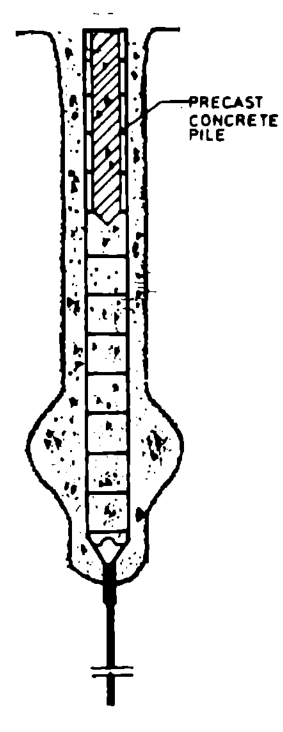
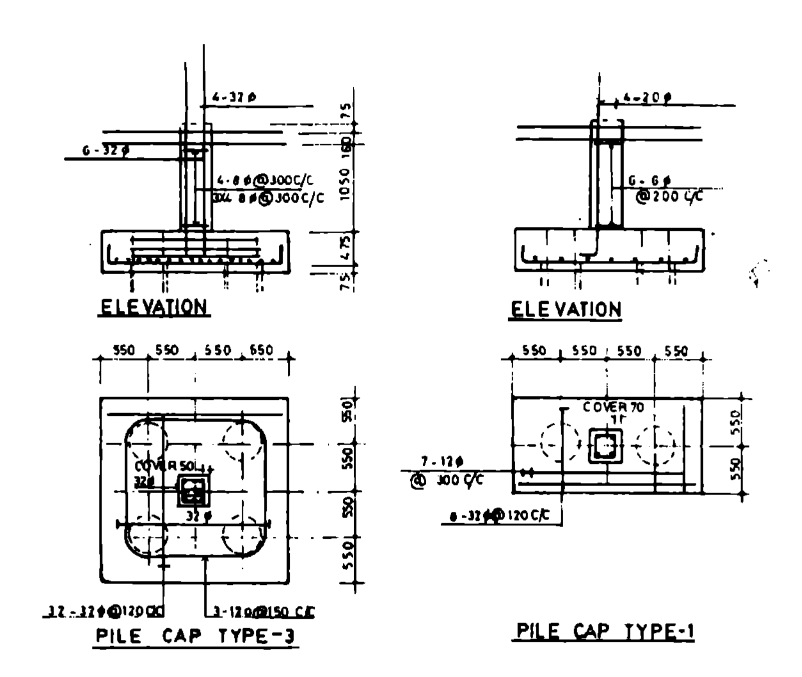


FIG.5

/تابع/ مراحل سبر وتد



نماذج من توضّع قبعات الأوتاد تحت الأساسات

الحمولات المسموحة على الأوتاد Allowable Loads On Piles

الصيغة الديناميّة (أو الديناميكية)، المستخدمة على نطاق واسع في الولايات المتحدة، لتحديد الحمولة الستاتيكية المسموحة على الوتد، هي الصيغة المسماة بصيغة الأخبار الهندسية – Engineering News formula. فمن أجل الأوتاد الغائصة بالمطرقة الآلية الساقطة تكون الحمولة المسموحة:

$$P_a = \frac{2WH}{p+1}$$

ومن أجل الأوتاد الغائصة بالمطرقة البخارية، تكون الحمولة المسموحة:

$$P_a = \frac{2WH}{p + 0.1}$$

حيث:

P_a = حمولة الوتد المسموحة، مقدرة بـــ tons (Kg)

W = وزن المطرقة، tons (Kg)

H = ارتفاع سقوط المطرقة، ft (m)

p = مقدار اختراق الوتد للأرض بالطرقة، in (mm). تتضمن المعادلتان السابقتان عامل أمان يساوي 6.

بما يخص جملة مجتمعة من الأوتاد تخترق طبقة ترابية تتمتع بمواصفات تحميل جيدة، وتقوم بنقل حمولاتها إلى تربة عن طريق نقاط نقل الحمولة في نهايات الأوتاد، ستكون الحمولة الإجمالية المسموحة عبارة عن مجموع الحمولات المسموحة المستقلة الخاصة بكل وتد.

أما بالنسبة للأوتاد التي تقوم بنقل حمولاتها إلى التربة عن طريق الاحتكاك السطحي على جوانب الأوتاد، ستكون الحمولة الإجمالية المسموحة أصغر من مجموع الحمولات المستقلة الخاصة بكل وتد، بسبب تبادل الفعل بين إجهادات القص والانفعالات المسببة في التربة من قبل كل وتد.

الأوتاد الشاقولية المحملة جانبيا
Laterally Loaded Vertical Piles

مقاومة الوتد الشاقولي للحمولات الجانبية (اللا شاقولية) تابعة لكل من الصلابة المرونية لغمد الوتد وصلابة تحمل التربة في القسم العلوي الذي يتراوح من 4 إلى 6 D من طول الغمد، حيث D = قطر الوتد أو درجة ثباتية أو غوص رأس الوتد.





نماذج من آليات سبر الأوتاد

لقد تمّ تطوير علاقة التضاد المتبادلة بين الحمولة الجانبية وتشوّه رأس الوتد من خلال الحلول اللابعدّية التخطيطية للمهندسين ريز وماتلوك – Reese and Matlock.

فالحل يفترض أن عامل التربة K يتزايد خطياً مع العمق z: بمعنى، $K = n_h Z$، حيث n_h = الأمثال العددية لرد فعل الطبقة السطحية المسوّاة، ويُحسب الطول المُميّز للوتد T من:

$$T = \sqrt{\frac{EI}{n_h}}$$

حيث: EI = صلابة الوتد.

ويُعطى التشوّه الجانبي y، لوتد ذي رأس طليق الحركة ويخضع لحمولة جانبية P_t وعزم M_t مُطبق في خط الأرض (الخط الناتج عن تقاطع المستوي الشاقولي مع المستوي الأفقي*)، بالعلاقة:

$$y = A_y P_t \frac{T^3}{EI} + B_y M_t \frac{T^2}{EI}$$

حيث، A_y وB_y أمثال عددية لا بعدية. كذلك فالأمثال العددية اللا بعدية تُستخدم لحساب قيمة ميل الوتد والعزم والقص ورد فعل التربة على امتداد الغمد.

من أجل العزم الموجب:

$$M = A_m P_t T + B_m M_t$$

يتم تمثيل القيمتين الموجبتين M_t وP_t بعزم يدور مع عقارب الساعة وبحمولات موجهة نحو اليمين على رأس الوتد في خط الأرض. يمكن تطبيق الأمثال العددية لحساب قيمة تشوّه رأس الوتد وحساب قيمة العزم الموجب الأعظمي وموضعه التقريبـــي في الغمد، z/T، حيث z = المسافة تحت خط الأرض، وقد تمّ إدراجها في الجدول 4.1.

الجدول 4.1 النسبة المئوية لحمولة القاعدة المنقولة إلى الجوف أو الغمد الصخري.

L_s/d_s	E_r/E_p 0.25	1.0	4.0
0.5	54*	48	44
1.0	31	23	18
1.5	17	12	8
2.0	13*	8	4

* مقدرة بواسطة تفسير حل طريقة العناصر المحدودة من أجل أمثال بواسون = 0.26

* من البداهة هنا أن يُحدّد المستوي الشاقولي بالمستوي الذي يحوي خط الحمولة. (المعدّ).

العزم السالب، المطبق على رأس الوتد عن طريق الغطاء الرأسي للوتد أو عن طريق أي عنصر إنشائي مُقيد الحركة، يمكن أن يتم حساب قيمته كتابع لميل الرأس (دوران) من العلاقة:

$$-M_t = \frac{A_\theta P_t T}{B_\theta} - \frac{\theta_s EI}{B_\theta T}$$

حيث، θ_s (rad) تمثل دوراناً موجباً بعكس عقارب الساعة لرأس الوتد، A_θ وB_θ أمثال عددية (انظر الجدول 4.1). تأثير درجات الثباتية (الغوص) لرأس الوتد على y وM يمكن أن تُحسب بتعويض قيمة M_t - من المعادلة السابقة في المعادلتين السابقتين لها لـــ y وM. لاحظ أنه من أجل حالة الرأس الموثوق يكون:

$$y_f = \frac{P_t T^3}{EI}\left(A_y - \frac{A_\theta B_y}{B_\theta}\right)$$

قدرة استيعاب القدم الارتكازية للحمولة (السعة الحملية للقدم)

Toe Capacity Load

يُمكن حساب حمولة الرأس المدبب الحدّية، بالنسبة للأوتاد المشيّدة في ترب متماسكة، من العلاقة:

$$Q_{bu} = A_b\, q = A_b\, N_c\, C_u \quad (4.1)$$

حيث:

A_b = مساحة تحميل نهاية الوتد.

q = السعة الحملية (قدرة استيعاب التحميل) للتربة.

N_c = عامل السعة الحملية.

C_u = مقاومة القص للتربة غير المصرفة، ضمن حدود منطقة تبعد مسافة تساوي قطر الوتد فوق الرأس المدبب للوتد وتبعد مسافة تساوي ضعفي قطر الوتد أسفل الرأس المدبب للوتد.

بالرغم من أن الشروط النظرية تفترض أنه من الممكن أن تتراوح N_c بين 8 و12، إلا أن N_c تؤخذ عادة مساوية لـــ 9.

بالنسبة للترب اللا متماسكة، يُعبّر عن إجهاد مقاومة قدم الارتكاز q بصورة تقليدية وفق المعادلة (4.1) باستخدام عامل السعة الحملية N_q وضغط التحميل الفعّال عند رأس الوتد المدبب σ'_{vo}:

$$q = N_q \sigma'_{vo} \le q_l \quad (4.2)$$

تبين بعض الأبحاث، بما يخصُّ الأوتاد الغائصة في الترب الرملية، أنّ P تقترب، كما هو الحال بالنسبة لـــ f_s، من القيمة شبه الثابتة q_l، بعد أن يتم اختراق طبقة التحميل في مدى يتراوح من 10 إلى 20 مرة من قطر الوتد.

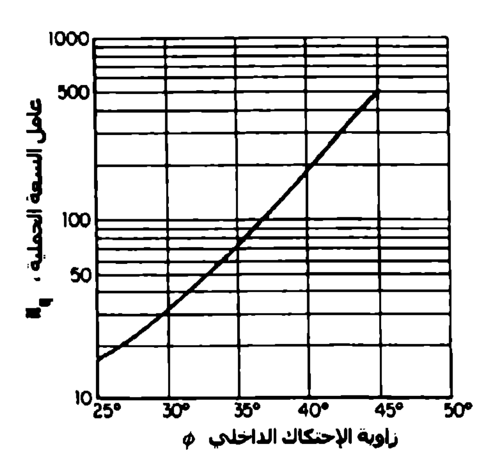
وبصورة تقريبية:

$$q_l = 0.5 \, N_q \tan \phi \quad (4.3)$$

حيث ϕ هي زاوية احتكاك تربة التحميل أسفل العمق الحرج. وتعطى قيم N_q المطبقة على الأوتاد من المعادلة 4.1. العلاقات الارتباطية الحقلية المأخوذة من بيانات تجارب التربة بين q وq_l قد تمّ تطبيقها للتوقع بنجاح السعة الحملية لنهايات الأوتاد في الترب الرملية.

Groups Of Piles — جملة مجتمعة من الأوتاد

قد تتألف الجملة الوتدية من حزمة أوتاد أو عدة أوتاد في صف ما. ويكون سلوك الجملة مُلقّناً من قبل جملة من الشروط الهندسية والتوجيهية والمكانية للحمولة وكذا من قبل ظروف الطبقة التي تقع تحت السطح مباشرةً.



الشكل 4.1 عامل السعة الحملية الخاص بالترب الحبيبيّة والمرتبط مع زاوية الاحتكاك الداخلي.

يُعبّر عادة عن الاعتبارات الخاصة بالحمولة الحدية باستخدام عامل كفاءة الجملة، الذي يستخدم لاختصار (لتخفيض) السعة الحملية لكل وتد في الجملة. ويُعرّف عامل الكفاءة E_g كنسبة من السعة الحملية الحدية للجملة على مجموع السعات الحملية الحدية لكل وتد في الجملة.

تُحسب قيمة E_g عادةً، كمجموع لمقاومة الاحتكاك الحدّية الطرفية أو الجانبية وسعات تحميل نهايات المصدات الترابية الكتلية ذات العرض B والعمق W والطول L، والتي تساوي تقريباً عامل كفاءة الجملة الوتدية. فمن أجل وتد مفترض وتباعد S (بين الأوتاد) وعدد من الأوتاد n، تكون قيمة E_g:

$$E_g = \frac{2(BL + WL)\bar{f}_s + BW_g}{nQ_u} \qquad (4.4)$$

حيث، $\bar{f}_s$ إجهاد الاحتكاك الجانبي المتوسط للمصد الكتلي وQ_u السعة الحملية لوتد منفرد. إن العدد المحدود من تجارب الجملة الوتدية ونموذج التجارب المتاح يفترض أنه من أجل ترب متماسكة يكون $E_g > 1$ إذا كانت S أكبر من 2.5 مرة من قطر الوتد ويفترض من أجل الترب اللا متماسكة أن $E_g > 1$ من أجل أصغر تباعد عملي. والاستثناء الممكن يعود إلى حالة أوتاد قصيرة جداً وذات مقطع عرضي متناقص إلى حد صغير جداً (مُدببة) وغائصة في تربة رملية هشة جداً.

إن مدى التباعد الوتدي الأصغري، عملياً، بالنسبة للأوتاد التقليدية، يقع ضمن 2.5 إلى 3.0 D. أما التباعد الأكبر فيطبق على نحو نموذجي في الأوتاد ذات القواعد الممتدة.

تحسب الطريقة التقريبية الجيدة، في تحليل الجملة الوتدية، الحد الأعلى لحمولة مقاومة الجملة Q_{gd} من:

$$Q_{gd} = A_F \gamma_F H_F + P\, Hc_n \qquad (4.5)$$

حيث؛ H_F وγ_F وA_F تمثل الثخانة وواحدة الوزن ومساحة السطح المملوء بالأوتاد في الجملة.

P و H وc_u هي: طول محيط الجملة وثخانة طبقات التربة مجتمعةً المخترقة بالأوتاد ومقاومة القص غير المصرفة (في الترب المشبعة) لها. هذا النوع من القوى كـ Q_{gd} يمكن تطبيقها فقط من أجل حالة الأوتاد المطروقة في طبقة صخرية من خلال حمولة مفرطة في الوزن في طبقة تربة تحت سطحية قابلة للانضغاط إلى حدٍّ كبير.

تعتمد عملية حساب وتصميم الجيوب الصخرية، بصورة تقليدية، على العلاقة:

$$Q_d = \pi d_s L_s f_R + \frac{\pi}{4} d_s^2 q_a \qquad (4.6)$$

حيث:

Q_d = حمولة التصميم المسموحة على الجيب الصخري.

d_s = قطر الجيب.

L_s = طول الجيب.

f_R = الإجهاد المسموح على التلاصق (الترابط) الصخري ــ البيتوني.

q_u = ضغط التحميل المسموح على الصخر.

تُظهر قياسات توزّع الحمولة، على أي حال، أن حمولة الانتقال إلى القاعدة أصغر بكثير من تلك الحمولة المُحددة بالعلاقة (4.6). ويتم إثبات هذا السلوك عن طريق البيانات المعطاة في الجدول 4.1، حيث تكون L_s/d_s هي نسبة طول الغمد الأرضي (فتحة في الأرض يدخل فيها الوتد) إلى قطر الغمد وE_r/E_p هي نسبة عامل الصخر إلى عامل الغمد. يعكس الحل بطريقة العناصر المحدودة الملخص في الجدول 4.1 إلى حدٍّ ما الوضعية الواقعية في حال لم يتجاوز متوسط مقاومة قص الجدار الصخري القيمة الحدية f_R، بمعنى، عدم حدوث الانزلاق على امتداد ضلع جدار الجيب.

يتم تطبيق طريقة التصميم المُبسَّطة، التي تأخذ بعين الاعتبار وعلى نحوٍ تقريبـــي شكل الانسجام أو التوافق بين مقاومة الجيب والقاعدة، كما يلي:

1. اجعل الجيب الصخري الخاص بحمولة التصميم Q_d متناسباً مع المعادلة (4.6) على فرضية أن إجهاد تحميل النهاية أقل من q_u [فإذا كان $q_u/4$، فهو يكافئ افتراض أن حمولة القاعدة $Q_b = \frac{q_u}{4} d_s^2 \left(\frac{\pi}{4}\right)$]
2. احسب $Q_b = R\ Q_d$، حيث، R هي أمثال (مضاعفات) حمولة القاعدة المفسرة من الجدول 4.1.
3. إنْ لم تكن $R\ Q_d$ مساوية إلى Q_b الافتراضية، كرِّر العملية مع قيمة جديدة لــ q_u إلى أن يتم الوصول إلى قيمة مقاربة، و$q \le q_u$.

لابد للتصميم النهائي أن يُختبر إزاء درجة (أو مقدار) غوص التثبيت المسموحة للغمد المحفور.

يتم الحصول على حل أكثر واقعية وفق الطريقة السابقة باتباع توصيات روزنبرغ ويورنيوكس – Rosenberg-Journeanx's Recommendations وذلك إذا ما تم استبدال f_{Ru} بـــ f_R.

مثالياً، يجب أن يتم تعيين f_{Ru} من اختبارات الحمولة. وإذا ما تم اختيار هذا المتحول أو الوسيط (البارامتر) من البيانات التي لا تضع حداً مميزاً، فإن عامل أمان يساوي على الأقل إلى 1.5 يجب أن يطبق على f_{Ru} كتعويض عن الريبات والشكوك المرتبطة بعلاقات المقاومة المتبادلة UC (روزنبرغ ويورينوكس "تجارب الاحتكاك وتحميل النهايات على الوسادة الصخرية من أجل تصحيح جيب ذي سعة حملية عالية" المجلة الجيوتكنيكية الكندية 13 (3))

تحليل استقرارية الأساس Foundation-Stability Analysis

الحمولة العظمى، التي يمكن أن تعبأ بها أو تتحملها عناصر الأساسات العائمة (ذات عمق قليل) عند طور الانهيار المبكر (السعة الحملية)، تكون تابعة لتماسك وزاوية احتكاك الترب الحاملة، بالإضافة إلى عرض (B) وشكل الأساس. ويُعبَّر عن السعة الحملية الصافية بواحدة المساحة، q_u، لأساس طويل بطريقة تقليدية وفق:

$$q_u = \alpha_f c_u N_c + \sigma'_{vo} N_q + \beta_f \gamma B N_\gamma \quad (4.7)$$

حيث؛

α_f = 1.0 من أجل أساسات شريطية وتساوي 1.3 من أجل أساسات دائرية أو مربعة.

c_u = مقاومة القص غير المصرفة للتربة.

σ'_{vo} = إجهاد القص الشاقولي الفعّال في التربة عند مستوى أسفل الأساس.

β_f = 0.5 من أجل أساسات شريطية وتساوي 0.4 من أجل أساسات مربعة وتساوي 0.6 من أجل أساسات دائرية.

γ = واحدة الوزن للتربة.

B = عرض الأساس بالنسبة للأساسات المربعة والمستطيلة ونصف القطر بالنسبة للأساسات الدائرية.

N_c، N_q، N_γ = عوامل السعة الحملية، وهي توابع لزاوية الاحتكاك الداخلي ϕ.

بما يخص التحميل اللا مصرف (السريع) للترب المتماسكة، تكون $\phi = 0$ وتختصر المعادلة (4.7) إلى:

$$q_u = N'_c \ c_u \quad (4.8)$$

حيث؛ $N'_c = \alpha_f N_c$.

أمّا بما يخص التحميل المصرف (البطيء) للترب المتماسكة تكون ϕ وc_u مُحددة عن طريق زاوية الاحتكاك الفعّال ϕ' والإجهاد الفعّال c'_u.

التعديلات على المعادلة (4.7) متاحة أيضاً لتوقع قيمة السعة الحملية للتربة المفروشة وكذا التحميل اللا تمركزي.

بطبيعة الحال، نادراً ما تتحكم q_u بتصميم الأساس عندما يكون عامل الأمان ضمن مدى يتراوح بين 2.5 إلى 3. (بالتأكيد لابد من تحريض الزحف أو الخضوع المكاني لكي تكون هناك إمكانية لحدوث غوص مفرط. يأخذ هذا الاعتبار أهمية خاصة عندما يتم اختيار عامل أمان للأساسات المستندة على ترب غضارية من رخوة إلى ثابتة وذات لدونة من متوسطة إلى عالية).

تعتمد المعادلة (4.7) على أساس شريطي طويل إلى حد لا نهائي، لذا لابد من تصحيحها من أجل الأشكال الأخرى للأساسات. وعوامل التصحيح التي يجب أن تضرب بها عوامل السعة الحملية معطاة في الجدول 4.2 الذي فيه L = طول الأساس.

يفترض مشتق المعادلة (4.7) أن الترب متجانسة ضمن حدود المنطقة المعرضة للإجهاد، والتي تشكل حالة نادرة. بالمحصلة، قد تكون التعديلات مطلوبة بسبب الابتعاد عن التجانسية. فإذا كان التغير معتدلاً في مقاومة الترب الرملية فيكون من الأكثر أمناً استخدام المعادلة (4.7) ولكن بعوامل سعة حملية تُمثل المقاومة المتوسطة التي لها ميزة مفضلة عن غيرها.

الجدول 4.2 التصحيحات الشكلية الخاصة بعوامل السعة الحملية للأساسات العائمة (ذات العمق القليل)

شكل الأساس	عامل التصحيح		
	N_c	N_q	N_γ
مستطيل*	$1+\left(\frac{B}{L}\right)\left(\frac{N_q}{N_c}\right)$	$1+\left(\frac{B}{L}\right)\tan\varphi$	$1-0.4\left(\frac{B}{L}\right)$
دائرة ومربع	$1+\left(\frac{N_q}{N_c}\right)$	$1+\tan\varphi$	0.60

* عامل الأمان غير مطلوب بالنسبة للأساسات الشريطية الطويلة.

قد يكون للتحميل اللامركزي تأثير قوي في اختيار مقدار التحميل بالنسبة لتصميم الأساس. فالطريقة التقليدية هي جعل الأساس متناسباً بحيث يستطيع أن يعبأ أو يتحمل القوة النهائية الناتجة ضمن ثلثه الأوسط. فيفرض أن الأساس صلب ويُفرض أن ضغط التحميل يتغير خطياً كما هو موضح بالشكل (4.2 b). فإذا كانت القوة النهائية الناتجة تقع خارج الثلث الأوسط عن الأساس، فيفرض أن هناك تحميلاً فوق جزء من الأساس فقط كما هو موضح في الشكل (4.2d). وبالنسبة للحالة التقليدية يكون ضغطا التحميل الأعظمي والأصغري:

$$q_m = \frac{P}{BL}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \qquad (4.9)$$

حيث:

B = عرض الأساس المستطيل.

L = طول الأساس المستطيل.

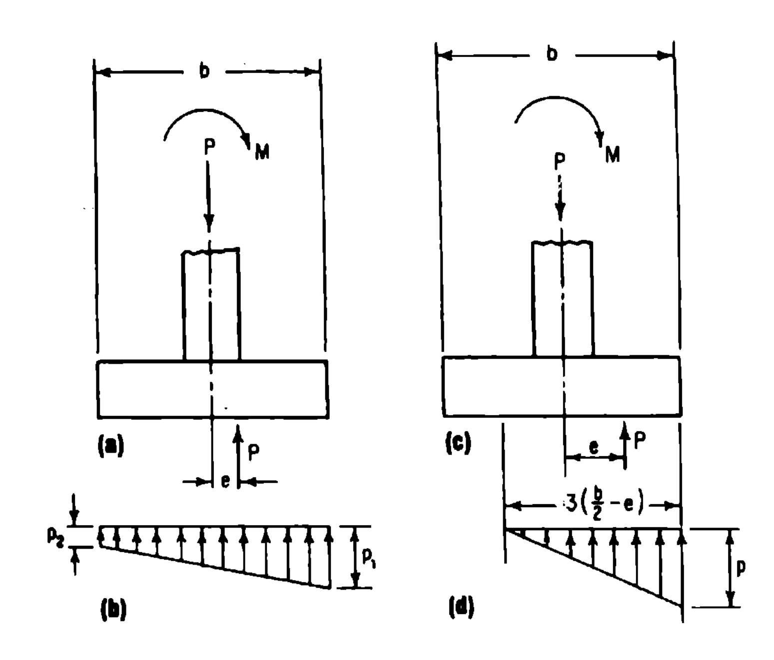
e = لا مركزية التحميل.

بالنسبة للحالة الأخرى (الشكل 4.3 c)، يتراوح مدى ضغط التربة من 0 إلى أقصى مدى:

$$q_m = \frac{2P}{3L(B/2 - e)} \qquad (4.10)$$

بما يخص الأساسات المربعة أو المستطيلة الخاضعة لعزمي انقلاب حول المحورين الأساسيين وكذا بما يخص الأساسات اللا متناظرة، يتم تعيين لا مركزيتي التحميل e_1 وe_2 حول المحورين الأساسيين. بالنسبة للحالة التي تكون فيها مساحة التحميل للأساسات مشغولة أو مُحملة بأكملها، فإن q_m تُعطى عن طريق مسافات الابتعاد عن المحورين الأساسيين c_1 وc_2 وعن طريق نصف قطر الدوران لمساحة الأساس حول المحورين الأساسيين r_1 وr_2 وعن طريق مساحة الأساس A وذلك كما يلي:

$$q_m = \frac{P}{A}\left(1 + \frac{e_1 c_1}{r_1^2} + \frac{e_2 c_2}{r_2^2}\right) \qquad (4.11)$$



الشكل 4.2 أساسات خاضعة لعزم انقلاب

بالنسبة للحالة التي يكون فيها جزء من الأساس فقط خاضعاً للتحميل، يتم تحديد الضغط الأعظمي بصورة تقريبية عن طريق التجربة والخطأ أو ما يسمى المحاولة بالخطأ والصواب.

بما يخص جميع حالات تحميل الاستناد اللا مركزي، يجب ألّا تتجاوز ضغوط (حافة الأساس) العظمى مقاومة قص التربة، وكذلك يجب أن يكون عامل الأمان على الأقل 1.5 (ويفضل 2) ضد عزم الانقلاب.

السعة الحملية المحورية للأوتاد المفردة (المنعزلة)

Axial-Load Capacity Of Single Piles

يمكن أن تؤخذ السعة الحملية للوتد Q_u كمجموع لمقاومتين، هما مقاومة التحمل للغمد الترابي Q_{su} ومقاومة تحمل قدم الاستناد Q_{bu}.

إذن، فالحمولة المسموحة Q_a يمكن أن يتم تعيينها إمّا من المعادلة (4.12) أو من المعادلة (4.13):

$$Q_a = \frac{Q_{su} + Q_{bu}}{F} \qquad (4.12)$$

$$Q_a = \frac{Q_{su}}{F_1} + \frac{Q_{bu}}{F_2} \qquad (4.13)$$

حيث: F و F_1 و F_2 هي عوامل أمان. وبصورة نموذجية، تقع F، بالنسبة للمنشآت الدائمة، بين 2 و3، إلا أنها قد تكون أكبر من ذلك بالاعتماد على الثقة المعوّل عليها والتي يتم إدراكها في التحليل والإنشاء وكذا بالاعتماد على نتائج الانهيار. تُقرُّ المعادلة (4.13) بأن التحولات، المفترض أن تحدث تحت تأثير التعبئة التامة لـــ Q_{su} وQ_{bu}، ليس من الضروري أن تتفق معها.

فمثلاً، قد تتنامى Q_{su} عند إزاحات أقل من 0.25 إنش (6.35 mm)، بينما قد تتحقق Q_{bu} عند إزاحة لقدم الاستناد مكافئة لـــ 5 أو لـــ 10 من قطر الوتد.

بالمحصلة، من الممكن أن تؤخذ قيمة F_1 مساوية إلى 1.5 وF_2 مساوية إلى 3.0، وذلك إذا كان عامل الأمان المكافئ المنفرد يساوي F أو أكبر منها.

(إذا كان، $Q_{su}/Q_{bu} < 1.0$، فإن F أقل من 2.0، وتعتبر عادة عامل أمان رئيسي بالنسبة للمنشآت الدائمة).

Shaft Settlement عمق غمد التثبيت

يمكن أن يتم تقدير عمق أغماد التثبيت المحفورة من خلال تحليل الروابط الحقلية (العملية) المتبادلة أو من خلال تحليل التوافقية بين الحمولة والتحوّل. الطرق الأخرى المستخدمة لتقدير عمق تثبيت الأغماد المحفورة، منعزلة أم على شكل مجموعة، تتطابق تماماً مع تلك الطرق المستخدمة في الأوتاد. وتتضمن هذه الأخيرة الحلول المرونية والمرونية نصف الحقلية وحلول نقل الحمولة وذلك بالنسبة لأغماد منعزلة محفورة في ترب متماسكة أو في ترب غير متماسكة.

لابد أن يتم حساب قيمة مقاومة الشد والحمولات الجانبية من قبل فتحات الأغماد المحفورة المستقيمة حسبما ورد تحديده في أساسات الأوتاد. بالنسبة للأغماد الصلبة نسبياً بطول مُميّز T أكبر من 3، يوجد دليل على أن وصلات تثبيت الوتد بالغمد تزيد من المقاومة الجانبية. والمقاومة الحدية Q_{ul}، المضافة إلى الجزء المرفوع من الغمد المحاط بالوصلة، يمكن حساب قيمتها على نحو تقريبي، بالنسبة لنماذج تربة متماسكة ومن أجل السعة الحملية [Eq.(4.14)] والاحتكاك الاسطواني [Eq.(4.15)]، كتابع لقطر الغمد D ولقطر الوصلة D_b.

من أجل الحل بالسعة الحملية، تكون:

$$Q_{ul} = \frac{\pi}{4}(D_b^2 - D^2)N_c \omega C_u + W_p \quad (4.14)$$

يَعتَبر معامل تخفيض المقاومة القصية ω في المعادلة (4.14) أنّ التأثيرات مضطربة وتتراوح من $\frac{1}{2}$ (في الإنشاء الرطب) إلى $\frac{3}{4}$ (في الإنشاء ذي الملاط الجاف). ويمثل C_u المقاومة القصية اللا مصرفة للتربة فوق سطح الوصلة تماماً، وN_c هو عامل السعة الحملية.

يفترض أن سطح الهيار نموذج اسطوانة الاحتكاك، بصورة تقليدية، شاقولي، بدءاً من قاعدة الوصلة. وبالتالي يمكن أن يتم تعيين Q_{ul} من أجل الترب المتماسكة واللامتماسكة من:

$$Q_{ut} = \pi_b L f_{ut} + W_s + W_p \qquad (4.15)$$

حيث؛

f_{ut} إجهاد الاحتكاك السطحي الحدّي المتوسط الذي يتنامى في الشد على مستوي الانهيار، بمعنى؛ $f_{ut} = 0.8\overline{C_u}$ من أجل الترب الغضارية أو $f_{ut} = K\overline{\sigma_{vo}}\tan\phi$ من أجل الترب الرملية.

W_s و W_p تمثلان وزن التربة المحتواة ضمن مستوي الانهيار ووزن الغمد على التوالي.

مقاومة الغمد في الترب اللا متماسكة

Shaft Resistance In Cohsionless Soils

إجهاد المقاومة للغمد $\bar{f}_s$ تابع لزاوية احتكاك الغمد الترابي δ (درجة) ولعامل ضغط التربة (الأرض) الجانبي الحقلي K:

$$\overline{f_s} = K\overline{\sigma}'_{vo}\tan\delta \le f_l \qquad (4.16)$$

عندما تصل اختراقات الأوتاد الإزاحية إلى 10 وحتى 20 مرة من قطر الوتد (في رمل هش أو كثيف)، يقترب الاحتكاك السطحي المتوسط من القيمة الحدودية f_l.

وبالاعتماد على الكثافة النسبية وبنية التربة، بصورة أولية، تكون f_l قد حُسبت قيمتها التقريبية بطريقة محافظة باستخدام المعادلة (4.16) لحساب f_s.

بما يخصُّ الأوتاد الطويلة، نسبياً، الغائصة في الرمل، تؤخذ K بطريقة نموذجية ضمن مجال يتراوح من 0.7 إلى 1.0 وتؤخذ δ حوالي (5 - φ)، حيث φ هي زاوية الاحتكاك الداخلي مقدرة بالدرجات.

وبالنسبة للأوتاد التي طولها أقل من 50 قدم (15.2 m)، يكون من المرجح أكثر أن تتراوح K من 1.0 إلى 2.0، إلا أنها قد تكون أكبر من 3.0 بالنسبة للأوتاد المتناحفة

(تتناحف باتجاه الرأس الغائص إلا أنها غير مدببة). كذلك فقد تم استخدام الإجراءات والطرق الحقلية لحساب قيمة f_s من تجارب الموقع الطبيعي - in situ، مثل تجارب اختراق المخروط والاختراق القياسي والكثافة النسبية. تعتمد المعادلة (4.17) على تجارب الأختراق القياسي، وكما هو مُقترح من قبل ميرهوف Meyerhof، فهي محافظة على عموميتها وتمتاز بالبساطة:

$$\bar{f}_s = \frac{\overline{N}}{50} \qquad (4.17)$$

حيث، $\overline{N}$ = مقاومة الاختراق القياسية المتوسطة ضمن الطول المدفون للوتد و $\bar{f}_s$ تُعطى بـــ $tons/ft^2$.

5

صيغ البيتون

Concrete Formulas

Reinforced Concrete البيتون المسلح

عند التعامل مع مادة البيتون المسلح وكذا عند تصميم المنشآت البيتونية المسلحة، فإن ما يتم استخدامه على نحوٍ واسع هو الإصدار الأخير لـــ:

The American Concrete Institute (ACI) Building Code Requirements for Reinforced Concrete

[متطلبات كود البناء للبيتون المسلح العائدة لمعهد الدراسات البيتونية الأميركي.]

سيُشار إلى المراجع المستقبلية (من الآن فصاعداً) عن هذه الإصدارات بـــ كود الـــ ACI (the ACI Code).

كذلك الأمر، فإن ما يتم استخدامه على نحو مفرط في تصميم وبناء منشآت البيتون المسلح هو منشورات جمعية الاسمنت البورتلاندي - Portland Cemert Association (PCA) تغطي الصيغ في هذا الفصل المبادئ العامة للبيتون المسلح واستخدامه في شتى التطبيقات الإنشائية. وكلما تطلب الأمر مواجهة الكود، لابد للقارئ أن يعود إلى الإصدار الحالي لكود الـــ ACI المذكور سابقاً. كما لابد له أيضاً من الرجوع إلى إصدارات (منشورات) الـــ PCA الخاصة بالتوصيَات والمتطلبات الحديثة.

نسبة الماء إلى مواد الخلطة الإسمنتية

Water/Cementitious Materials Ratio

تُستخدم نسبة الماء/المواد الإسمنتية (C/W) في كلٍّ من تحليل مقاومة الشد والضغط للإسمنت البيتوني البورتلاندي. ويتم إيجاد هذه النسبة من:

$$\frac{W}{C} = \frac{W_m}{W_c}$$

حيث:

W_m = وزن ماء المزج في الخلطة، مقدراً بـــ lb(Kg).

W_c = وزن المواد الإسمنتية في الخلطة، مقدراً بـــ lb(Kg)

يضع الكود ACI جداول للعلاقة النموذجية بين النسبة W/c بالوزن (أو الونية9 ومقاومة البيتون على الضغط.

تتغير النسب (نسب $\underline{w}$)، الخاصة بالبيتون الذي لا يتضمن محتوى هوائي، بين 0.41 من أجل مقاومة ضغط $6000\ lb/in^2$ (41 MPa) لمدة 28 يوم و0.82 من أجل مقاومة ضغط $2000\ lb/in^2$ (14 MPa). أما بما يخص البيتون ذا المحتوى الهوائي، فإن النسب تتغير من 0.40 إلى 0.74 من أجل مقاومتي ضغط $5000\ lb/in^2$ (34 MPa) و$2000\ lb/in^2$ (14 MPa) على التوالي. تأكد من ذلك بالرجوع إلى كود الـــ ACI من أجل قيمة ملائمة للنسبة W/c عند إعداد التصاميم أو تحليل البيتون*.

عدا عن ذلك، يضع كود الـــ ACI جداولاً للنسب W/c الأعظمية وذلك عندما لا تتوفر بيانات أو معلومات عن المقاومة. فالنسب المطلقة W/C بالوزن تتغير من 0.67 إلى 0.38 من أجل بيتون بدون محتوى هوائي ومن 0.54 إلى 0.35 من أجل بيتون بمحتوى هوائي. وهذه القيم خاصة بمقاومة الضغط المميزة 28 يوم f'_c مقدرة بـــ lb/in^2 أو بـــ MP_a وذات قيمة تتراوح من $25\ lb/in^2$ (17 MPa) إلى $5000\ lb/in^2$ (34 MPa). مرة أخرى، عد إلى كود الـــ ACI قبل أن تقوم بأي تصميم أو اتخاذ قرارات إنشائية.

كذلك، فقد تمت جدولة النسب الأعظمية W/C، الخاصة بشروط إنشائية متنوعة، في كود الـــ ACI. وتتضمن الشروط الإنشائية، البيتون المحمي من التعرض للصقيع وذوبانه والبيتون المعني بأن يكون كتيماً للماء والبيتون المعرّض لأملاح تذويبية ولمياه ضاربة للملوحة ولمياه بحرية، ... الخ. الصيغ التطبيقية المتعلقة بالنسب W/C سوف تعطى في هذا الفصل.

* لاحظ أنه كلما كَبُرت النسبة w/c قلّت مقاومة ضغط البيتون. (المعدّ).

حجم خلطة البيتون المكافئة لمهمة ما

Job Mix Concrete Volume

يمكن أن يتم اختبار الخلطة البيتونية التجريبية لتعيين كم يجب من مادة البيتون أن تُشحن من موقع الخلط. ولكي تُحدِّد الحجم اللازم للمهمة*، اجمع الحجم المطلق V_a للمركبات الأربعة: الإسمنت والبحص والرمل والماء.

قم بإيجاد V_a من أجل كل مركبة من:

$$V_a = \frac{W_L}{(SG)W_u}$$

حيث:

V_a = الحجم المطلق، ft^3 (m^3).

W_L = وزن المادة، lb (Kg).

SG = الوزن النوعي للمادة.

W_u = كثافة الماء عند الشروط الجوية النظامية ($62.4\ lb/ft^3; 1000\ Kg/m^3$)

ومن ثم، سيكون حجم العمل الناتج يساوي إلى مجموع V_a للإسمنت والبحص والرمل والماء.

عامل مرونة البيتون Modulus Of Elasticity Of Concrete

يُعطى عامل مرونة مادة البيتون - المطور بالطريقة المعدّلة من قبل كود الـــ ACI - وفق العلاقة:

* نفترض هنا أن كمية الأمتار المكعبة من مادة البيتون اللازمة للمنشأة معروفة، ويبقى حساب حجم الخلطة أو ما يسمى حجم خلطة المركبات البيتونية لكي نحصل على الحجم اللازم المكافئ لحجم المنشأة تفادياً لحصول هدر أو نقص.؟. (المعدّ).

$E_c = 33W_c^{1.5}\sqrt{f'_c}$ lb/in^2 (in USCS units – بالواحدات الأميريكية)

$E_c = 0.043W_c^{1.5}\sqrt{f'_c}$ MPa (in SI units – بالواحدات العالمية)

ويمكن أن تُبسَّط هاتان العلاقتان من أجل بيتون ذي وزن طبيعي وكثافة طبيعية إلى:

$E_c = 57{,}000\sqrt{f'_c}$ lb/in^2 (in USCS units – بالواحدات الأميريكية)

$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$ MPa (in SI units – بالواحدات الدولية)

حيث:

E_c = عامل مرونة البيتون، مقدراً بـــ lb/in^2 (MPa).

f'_c = مقاومة الضغط المميزة للبيتون في اليوم 28، مقدرة بـــ lb/in^2 (MPa).

مقاومة الشد للبيتون Tensile Strength Of Concrete

تستخدم مقاومة شد البيتون في التصميم على الإجهاد المركب. ففي البيتون ذي الوزن الطبيعي والكثافة الطبيعية، يمكن أن يتم إيجاد مقاومة الشد من:

$f_r = 7.5\sqrt{f'_c}$ lb/in^2 (in USCS units) (بالواحدات الأميريكية)

$f_r = 0.7\sqrt{f'_c}$ MPa (in SI units – بالواحدات الدولية)

فولاذ التسليح Reinforcing Steel

تغطي مواصفات الجمعية الأميريكية للمواد والاختبارات (ASTM) فولاذ التسليح. إن أهم الخصائص التي يجب أن يتمتع بها فولاذ التسليح هي:

1. عامل المرونة E_s، lb/in^2 (MPa).
2. مقاومة الشد، lb/in^2 (MPa).

3. نقطة إجهاد الخضوع f_y، lb/in^2 (MPa).

4. المخطط البياني لمنحني انحدار (خضوع) الفولاذ (مقاومة الخضوع).

5. قياس أو قطر القضيب أو السلك.

الجيزان المستمرة والبلاطات ذات الاتجاه الواحد

Continuous Beams And One-Way Slabs

يعطي كود الـــ ACI صيغاً تقريبية لإيجاد القص وعزوم الانعطاف في الجيزان المستمرة والبلاطات ذات الاتجاه الواحد. والقائمة الملخصة عن هذه الصيغ ستأتي فيما بعد. فهي قابلة للتطبيق على نحو متساوٍ في كل من نظامي الواحدات الدولية SI والواحدات الأميريكية USCS. ارجع إلى كود الـــ ACI للحصول على تطبيقات مُميزة لهذه الصيغ.

من أجل العزم الموجب

في نهايات المجاز

إذا كانت النهاية اللا مستمرة غير مقيدة $W_n^2/11$

إذا كانت النهاية اللا مستمرة متكاملة مع المسند $Wl_n^2/12$

في المجازات الداخلية $Wl_n^2/16$

من أجل العزم السالب

العزم السالب عند الوجه الخارجي لأول مسند داخلي

مجازين $Wl_n^2/9$

أكثر من مجازين $Wl_n^2/10$

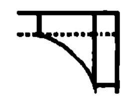
العزم السالب عند الوجوه الأخرى للمساند الداخلية $W_n^2/11$

العزم السالب عند وجوه جميع المساند من أجل؛

(a) بلاطات بمجازات لا تتجاوز 10 أقدام (3 m). (b) جيزان وعوارض تتجاوز فيها نسبة مجموع صلابة العمود إلى صلابة الجائز المقدار 8 عند كل نهاية للمجاز. $Wl_n^2/12$

العزم السالب عند الوجوه الداخلية للمساند الخارجية من أجل

عناصر مبنية على شكل متكامل مع مساندها



عندما يكون المسند جائزاً مليء الزاوية أو عارضة ثقيلة $Wl_n^2/24$

عندما يكون المسند عموداً $Wl_n^2/16$

قوى القص

قوة القص في نهاية العناصر عند أول مسند داخلي $1.15\ Wl_n/2$

قوة القص عند جميع المساند الأخرى $Wl_n/2$

ردود أفعال النهايات

يتم الحصول على ردود أفعال الجيزان أو الأعمدة أو الجدران بجمع قوى القص التي تفعل على طرفي المسند.

طرق تصميم الجيزان والأعمدة والعناصر الإنشائية الأخرى

Design Methods For Beams, Columns, And Other Members

هنالك عدد من الطرق المختلفة للتصميم مستخدمة في منشآت البيتون المسلح.

والطرق الثلاثة الأكثر شيوعاً هي: التصميم بإجهاد التشغيل – Working - stress design والتصميم بالمقاومة الحدية (القصوى) – Ultimate-strength design وطريقة التصميم بالمقاومة – strength design method. ويوجد لكل طريقة من هذه الطرق مؤيدها وداعمها. ولابد من استشارة الإصدار الأخير لكود الـــ ACI من أجل التصاميم الواقعية.

الجيزان

يمكن أن تُعتبر الجيزان البيتونية ذات ثلاثة أنواع أساسية:

(1) جيزان مستطيلة المقطع بتسليح شد فقط.

(2) جيزان T بتسليح شد فقط.

(3) جيزان بتسليح شد وضغط.

الجيزان المستطيلة بتسليح شد فقط

يتضمن هذا النوع من الجيزان البلاطات، حيث يكون من أجلها عرض الجائز b مساوياً إلى 12 إنش (305 mm) وذلك عندما يُعبّر عن العزم والقص بالقدم (بالمتر) من العرض. وتكون الإجهادات في البيتون والفولاذ، باستخدام صيغ التصميم بإجهاد التشغيل، هي:

$$f_c = \frac{2M}{kjbd^2} \qquad f_s = \frac{M}{A_s jd} = \frac{M}{pjbd^2}$$

حيث: b = عرض الجائز [يساوي 12 إنش (304.8 mm) من أجل البلاطات]، مقدراً بـــ in (mm).

d = العمق الفعّال للجائز، مقاساً من الوجه المضغوط للجائز إلى مركز ثقل تسليح الشد (الشكل 5.1)، مقدراً بـــ in (mm).

M = عزم الانعطاف، مقدراً بـ lb.in (K.Nm).

f_c = إجهاد الضغط في أبعد ليف من البيتون، مقدراً بـ lb/in^2 (MPa).

f_s = الإجهاد في فولاذ التسليح، مقدراً بـ lb/in^2 (MPa).

A_s = مساحة المقطع العرضي لفولاذ التسليح، مقدرة بـ in^2 (mm^2).

j = نسبة (مضاعفات) المسافة بين مركز ثقل الضغط ومركز ثقل الشد إلى العمق d.

k = نسبة (مضاعفات) عمق المنطقة (المساحة) المضغوطة إلى العمق d.

p = نسبة مساحة المقطع العرضي لتسليح الشد إلى مساحة الجائز (أي: $p = A_s/bd$)

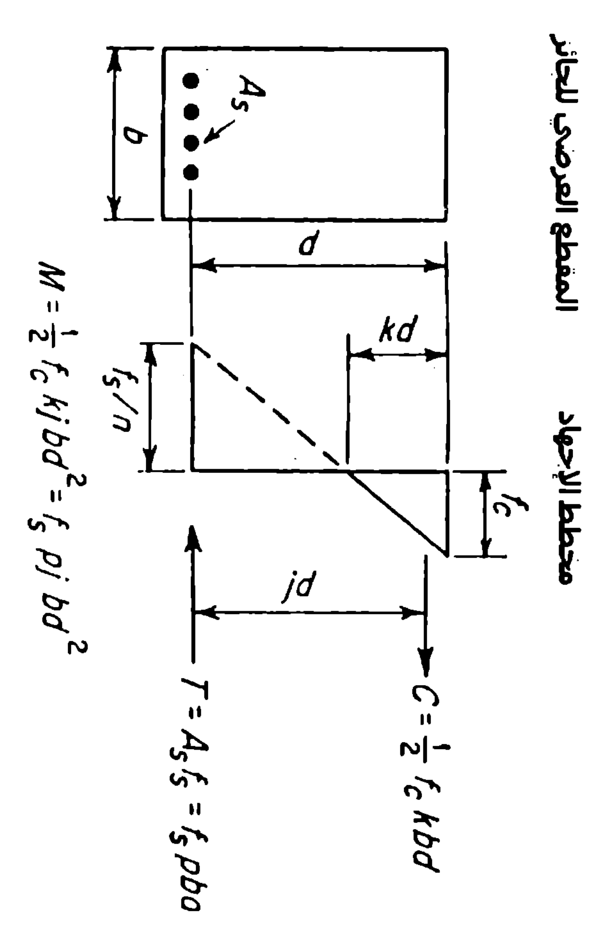
بالنسبة لأغراض التصميم التقريبية، يمكن أن تفرض j تساوي 7/8 و k تساوي 1/3.

كما ويمكن استخدام التوجيهات في الجدول 5.1 للعمق d للجائز البيتوني المسلح، وذلك بالنسبة للمنشآت المتوسطة الحجم.

أما بالنسبة للتصميم المتوازن الذي تكون فيه مادتا البيتون والفولاذ مُجهدتين إلى حد الإجهاد الأعظمي المسموح، فيمكن عندئذ استخدام الصيغ التالية:

$$bd^2 = \frac{M}{K} \qquad K = \frac{1}{2} f_e kj = pf_s j$$

لقد أعطيت قيم K و k و j و p، بالنسبة للإجهادات المستخدمة على نطاق واسع، في الجدول 5.2.



الشكل 5.1 جائز ذو مقطع مستطيل بتسليح شد فقط.

الجدول 5.1 توجيهات على العمق d لجائز بيتوني مسلح*

العنصر	d
بلاطات الأسطح والأرضيات	l/25
جيزان خفيفة	l/15
جيزان وعوارض ثقيلة	l/12 - l/10

* l هو مجاز الجائز أو البلاطة بالإنشات (بالميليمترات). عرض الجائز يجب أن يكون l/32 على الأقل

الجيزان T بتسليح شد فقط

عندما يتم صب أو إنشاء البلاطة على نحو متماسك مع الجيزان البيتونية الداعمة، يعمل جزء من البلاطة مثل عمل الشفة العلوية (الجناح أو الفلنجة) للجائز T. ويجب ألا يتجاوز عرض الشفة العلوية الفعّال: (1) ربع مجاز الجائز، (2) عرض جسد من الجائز T زائد 16 مرة ثخانة البلاطة، (3) المسافة من المركز إلى المركز بين جائزين. أما في الجيزان T حيث لا تكون الشفة العلوية جزءاً من البلاطة، فيجب أن تكون لها ثخانة شفة لا تقل عن نصف عرض الجسد وعرض شفة لا يزيد عن أربع مرات من عرض الجسد. فمن أجل التصاميم الأولية، يمكن استخدام تلك الصيغ التي سبق سردها من أجل الجيزان المستطيلة بتسليح شد فقط، لأن المحور المحايد يكون عادةً ضمن أو قرب الشفة. وتكون عادة مساحة تسليح الشد حرجة.

الجدول 5.2 الأمثال العددية K، k، j، p للمقاطع المستطيلة

f'_c	n	f_s	K	k	j	p
2000	15	900	175	0.458	0.847	0.0129
2500	12	1125	218	0.458	0.847	0.0161
3000	10	1350	262	0.458	0.847	0.0193
3750	8	1700	331	0.460	0.847	0.0244

f_s = 16,000 lb/in^2 (110 MPa)

الجيزان بتسليح شد وضغط

تُستخدم جيزان التسليح المضغوط عادةً عندما تكون أبعاد الجائز محدودة. فأبعاد الجائز المقبولة قد استخدمت في الصيغ المعطاة سابقاً لتعيين العزم الذي يستطيع تحمله الجائز بدون تسليح ضغط. إذن، فمتطلبات التسليح يمكن أن تُعيّن بصورة تقريبية من:

$$As = \frac{8M}{7f_s d} \qquad Asc = \frac{M - M'}{nf_c d}$$

حيث:

As = المساحة الإجمالية لتسليح الشد، in^2 (mm^2).

Asc = مساحة تسليح الضغط، in^2 (mm^2).

M = عزم الانعطاف الإجمالي، lb.in (K. Nm).

M' = عزم الانعطاف الذي سيتحمله الجائز لتصميم متوازن وله نفس أبعاد تسليح الشد فقط، lb.in (K. Nm).

n = نسبة (مضاعفات) عامل مرونة الفولاذ إلى عامل مرونة البيتون.

فحص الإجهادات في الجيزان

الجيزان المصممة باستخدام الصيغ التقريبية السابقة لابد وأن تُفحص للتأكد من أن الإجهادات الفعلية لا تتجاوز الإجهاد المسموح وللتأكد أيضاً من أن فولاذ التسليح ليس مفرطاً. يمكن أن يتم هذا عن طريق تعيين عزم عطالة الجائز. ففي هذا التعيين، يجب ألا يُعتبر الفولاذ أسفل المحور المحايد متعرضاً للإجهاد، في حين يجب أن يتم تحويل فولاذ التسليح إلى مقطع بيتوني مكافئ. فمن أجل تسليح الشد، يتم هذا التحويل عن طريق جداء المساحة As بـــ n، و n هي نسبة (مضاعفات) عامل مرونة الفولاذ إلى عامل مرونة البيتون.

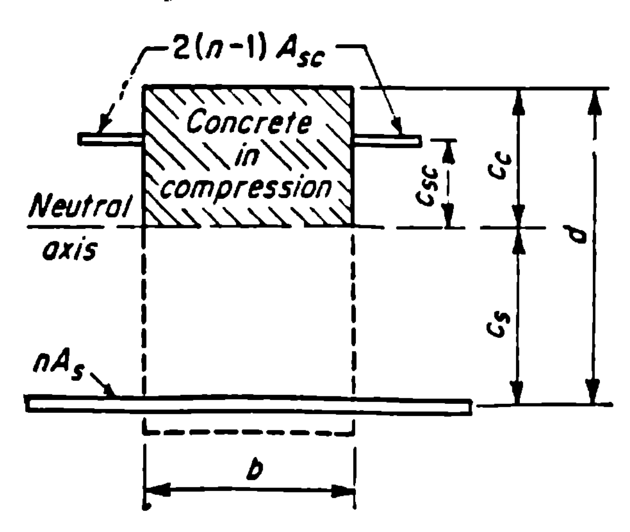
ومن أجل تسليح الضغط، تُضرب المساحة Asc بـــ (n - 1) 2. يتضمن هذا العامل تسامحات استبدال البيتون في حالة الانضغاط بفولاذ مضغوط وتسامحات الجريان اللدن للبيتون. إذن، يتم تحديد مكان المحور المحايد بحل المعادلة:

$$\frac{1}{2}bc_c^2 + 2(n-1)Asc\ Csc = n\ As Cs$$

بالنسبة للمجاهيل Cc وCsc وCs انظر الشكل 5.2.

ويكون عزم عطالة مقطع الجائز المحوّل هو:

$$I = \frac{1}{3}bC_c^3 + 2(n-1)Asc\ C_{sc}^2 + nAsC_s^2$$



الشكل 5.2 مقطع جائز بيتوني مُحوّل.

وتكون الإجهادات:

$$f_c = \frac{M_{Cc}}{I} \qquad f_{sc} = \frac{2nM_{Csc}}{I} \qquad f_s = \frac{nM_{Cs}}{I}$$

حيث:

f_c، f_{sc}، f_s = إجهادات الواحدة الفعلية، في أبعد ليف من البيتون وفي فولاذ تسليح الضغط وفي فولاذ تسليح الشد، على التوالي، مقدرة بـــ lb/in^2 (MPa).

C_c، C_{sc}، C_s = المسافات من المحور المحايد، إلى وجه البيتون وإلى فولاذ التسليح المضغوط وإلى فولاذ تسليح الشد، على التوالي، مقدرة بـــ in (mm).

I = عزم عطالة مقطع الجائز المحوّل، مقدراً بـــ in^4 (mm^4).

b = عرض الجائز، مقدراً بـــ in (mm)

وAs وAsc وM وn عُرِّفت سابقاً في هذا الفصل.

القص والشد القطري في الجيزان.

إن واحدة إجهاد القص، كقياس للشد القطري، في جائز بيتوني مسلح هي:

$$v = \frac{V}{bd}$$

حيث:

v = واحدة إجهاد القص، lb/in^2 (MPa).

V = القص الإجمالي، lb (N).

b = عرض الجائز (بالنسبة للجائز T استخدم عرض الجسد، in (mm).

d = العمق الفعّال للجائز.

في حال كانت قيمة إجهاد القص، المحسوبة سابقاً، تتجاوز واحدة إجهاد القص المسموح وفق ما هي معينة من قبل كود الـــ ACI، عندئذ لابد من تزويد الجسد بالتسليح.

ويتألف مثل هذا التسليح عادةً من الأساور (أتاري). وتكون مساحة المقطع العرضي، الذي يتطلب إسوارة متوضعة بالتعامد مع التسليح الطولاني، هي:

$$A_v = \frac{(V - V')s}{f_i d}$$

حيث:

A_v = مساحة المقطع العرضي لتسليح الجسد بالمسافة s (s مقاسة بالاتجاه الموازي للتسليح الطولاني) مقدرة بـــ in^2 (mm^2).

f_v = واحدة الإجهاد المسموحة في تسليح الجسد، lb/in^2 (MPa).

V = القص الإجمالي، lb (N).

V' = القص الذي يستطيع البيتون لوحده فقط أن يتحمله ($V' = v_c\,bd$).

s = تباعد الأساور بالاتجاه الموازي للتسليح الطولاني، in (mm).

d = العمق الفعّال، in (mm).

يجب أن تتباعد الأساور بحيث يتم اعتراض كل خط ممتد بزاوية °45، بدءاً من منتصف الجائز إلى قضبان تسليح الشد الطولانية، بإسوارة واحدة على الأقل.

وفي حال كان إجهاد واحدة القص أكبر من $3\sqrt{f'_c}$ ، lb/in^2 (MPa)، عندها لابد من اعتراض كل خط من هذه الخطوط بإسوارتين على الأقل.

يجب ألا يتجاوز إجهاد القص في أي مقطع المقدار $5\sqrt{f'_c}$ ، lb/in^2 (MPa).

ربط وإرساء قضبان التسليح.

الجيزان التي يكون فيها تسليح الشد موازياً لوجه الضغط، يكون إجهاد الربط المؤثر على القضبان:

$$u = \frac{V}{jd\Sigma_o}$$

حيث:

u = إجهاد الربط المؤثر على سطح القضيب، lb/in^2 (MPa).

V = القص الإجمالي، lb (N).

d = العمق الفعّال للجائز، in (mm).

Σ_o = مجموع أطوال محيطات قضبان تسليح الشد، in (mm).

ومن أجل التصميم الأولي، يمكن أن يتم فرض النسبة j مساوية لـــ 7/8.

قد لا تتجاوز إجهادات الربط القيم المُبيّنة في الجدول 5.3.

الأعمدة

لابد أن يكون للأعمدة الأساسية في المنشأة قطر أصغري يساوي 10 in (255 mm) أو ثخانة أصغرية تساوي 8 in (203 mm) بالنسبة للأعمدة المستطيلة ومساحة إجمالية للمقطع العرضي تساوي لـــ 96 in^2 (61,935 mm^2).

يكون للأعمدة القصيرة، المزودة بتسليح حلزوني ذي تباعدات متقاربة ويُغلّف النواة البيتونية الدائرية المسلحة بقضبان شاقولية، حمولة مسموحة أعظمية هي:

$$P = A_g (0.25 f'_c + f_s P_g)$$

حيث:

P = الحمولة المحورية المسموحة الإجمالية، lb (N).

Ag = مساحة المقطع العرضي الإجمالية للعمود، in^2 (mm^2).

f'_c = مقاومة ضغط البيتون، lb/in^2 (MPa).

الجدول 5.3 إجهادات الربط المسموحة*

	قضبان أفقية مع طبقة بيتونية مصبوبة أسفل القضبان تزيد عن 12 إنش (30.5 mm)		قضبان أخرى**	
قضبان شد بمقاييس وتشوهات متوافقة مع ASTM A305	$\frac{3.4\sqrt{f'_c}}{D}$ or350,	أيهما أقل	$\frac{4.8\sqrt{f'_c}}{D}$ or500,	أيهما أقل
قضبان شد بمقاييس وتشوهات متوافقة مع ASTM A408	$2.1\sqrt{f'_c}$		$3\sqrt{f'_c}$	
قضبان ضغط مشوهة	$6.5\sqrt{f'_c}$ or400,	أيهما أقل	$6.5\sqrt{f'_c}$ or400,	أيهما أقل
قضبان عادية بسيطة	$1.7\sqrt{f'_c}$ or160,	أيهما أقل	$2.4\sqrt{f'_c}$ or160,	أيهما أقل

* lb/in^2 (× 0.006895 = MPa).

** f'_c مقاومة ضغط البيتون ، lb/in^2 (MPa); D = القطر الاسمي (الاعتباري) للقضيب, in (mm)

f_s = الإجهاد المسموح في التسليح الشاقولي للبيتون، lb/in^2 (MPa)، ويساوي إلى 40 % من مقاومة الخضوع الأصغرية، إلا أنه لا يتجاوز $30,000\ lb/in^2$ (207 MPa)

P_g = نسبة مساحة التسليح الشاقولي الفولاذي إلى المساحة الإجمالية للعمود Ag.

يجب ألا تقل النسبة Pg عن 0.01 ولا تزيد عن 0.08.

العدد الأصغري من القضبان المستخدمة يساوي 6، والقياس الأصغري هو No.5.

التسليح الحلزوني المستخدم في العمود المسلح حلزونياً هو:

$$p_s = 0.45\left(\frac{Ag}{Ac} - 1\right)\frac{f'_c}{f_y}$$

حيث:

p_s = نسبة الحجم الحلزوني (الاسطوانة التي يحددها الفولاذ الحلزوني) إلى حجم النواة (المحاطة بالحلزون) البيتونية (قطر الاسطوانية الحلزونية من خارج إلى خارج الحلزون).

Ac = مساحة المقطع العرضي للنواة البيتونية (من خارج إلى خارج الحلزون)، in^2 (mm^2).

f_y = إجهاد الخضوع للتسليح الحلزوني، lb/in^2 (MPa)، ولا يتجاوز $60,000\ lb/in^2$ (413 MPa)

يجب ألا يتجاوز التباعد من المركز إلى المركز في الدورانات الحلزونية سدس قطر النواة البيتونية. ويجب ألا يتجاوز التباعد الداخلي (النظيف) بين الدورانات الحلزونية سدس قطر النواة أو 3 إنش (76 mm)، ويجب ألا يقل عن 1.375 إنش (35 mm) أو 1.5 مرة من الحجم الأعظمي للمواد الحبية المستخدمة في الخلطة البيتونية.

الأعمدة القصيرة المزودة بأربطة (أتاري)

الحمولة المسموحة الأعظمية، على الأعمدة القصيرة المسلحة بقضبان طولانية وبأربطة جانبية منفصلة، تساوي 85 % من تلك الحمولة المعطاة سابقاً العائدة للأعمدة المسلحة حلزونياً. يجب ألا تقل النسبة p_g، بالنسبة للأعمدة المربوطة جانبياً، عن 0.01 أو لا تزيد عن 0.08. ويجب أن يتألف التسليح الطولاني من أربعة قضبان على الأقل، قياسها الأصغري هو No.5.

الأعمدة الطويلة

لابد من تعديل الحمولات المسموحة على الأعمدة، حيث يكون الضغط متحكماً بالتصميم، بالنسبة لطول العمود وفق ما يلي:

1. في حال كانت نهايتا العمود موثوقتين، بحيث تحدث نقطةُ الرد الانثنائي (الانثناء العكسي) فيما بين النهايتين، عندها لابد من تقسيم الحمولة المحورية والعزوم المطبقة على R (R لا يمكنها أن تتجاوز 1.0) المأخوذة من العلاقة:

$$R = 1.32 - \frac{0.006h}{r}$$

2. وفي حال كانت الإزاحة الجانبية النسبية لنهايات الأعمدة مُعاقة وكان العنصر منحني بانحناء واحد، فلابد عندها من تقسيم، الحمولات المحورية والعزوم المطبقة، على R (R لا يمكنها تجاوز 1.0) المأخوذة من:

$$R = 1.07 - \frac{0.008h}{r}$$

حيث:

h = الطول اللا مسنود من العمود، in (mm).

r = نصف قطر دوران المساحة الإجمالية للبيتون، in (mm) ويساوي 0.30 مرة من العمق للعمود المستطيل، ويساوي 0.25 مرة من قطر العمود الدائري.

R = عامل تخفيض حمولة العمود الطويل.

أمّا عندما يكون الشد متحكماً بالتصميم فلابد من تعديل الحمولة المحورية والعزم المطبقين وذلك بطريقة مشابهة لما سبق، ماعدا R التي تتغير خطياً مع الحمولة المحورية بدءاً من القيم المعطاة عند شرط التوازن.

الضغط والانعطاف المركب

إن مقاومة العمود المتناظر يتم التحكم بها من قبل الضغط إذا كان للحمولة المحورية المكافئة N لا مركزية e في كلا الاتجاهين الرئيسيين ولا تزيد عما هو معطى في المعادلتين الآتيتين، ويتحكم الشد بمقاومة العمود إذا ما تجاوزت e هذه القيم (في المعادلتين الآتيتين) في أحد الاتجاهين الرئيسيين:

من أجل الأعمدة الحلزونية:

$$e_b = 0.43\ p_g\ m\ D_s + 0.14\ t$$

من أجل الأعمدة المربوطة جانبياً (أتاري):

$$e_b = (0.67\ p_g\ m + 0.17)\ d$$

حيث:

e = اللا مركزية، in (mm).

e_b = اللا مركزية المسموحة الأعظمية، in (mm).

N = الحمولة اللا مركزية الناظمية على المقطع العرضي للعمود، lb (N).

p_g = نسبة مساحة التسليح الشاقولي على المساحة الإجمالية للبيتون.

$m = f_c^{'}\ 0.85\backslash f_y$

D_s = قطر الدائرة المارة من مراكز قضبان التسليح الطولانية، in (mm).

t = قطر العمود أو العمق الكلي للعمود، in (mm).

d = المسافة من أبعد ليف مضغوط إلى مركز ثقل تسليح الشد، in (mm).

f_y = نقطة خضوع فولاذ التسليح، lb/in^2 (MPa).

يعتمد تصميم الأعمدة التي يتحكم بها الضغط على المعادلات الآتية - ماعدا الحالة التي يمكن ألا تتجاوز فيها الحمولة المسموحة N الحمولة المسموحة P المعطاة سابقاً - المقبولة في حالة كون الأعمدة تحمل حمولة محورية فقط:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_b} + \frac{f_{by}}{F_b} \leq 1.0$$

حيث:

f_a = الحمولة المحورية مقسومة على مساحة البيتون الإجمالية، lb/in^2 (MPa).

f_{bx}، f_{by} = عزما الانعطاف حول المحور x والمحور y، مقسومان على معامل المقطع للمقطع المحوّل المقابل وغير المتشقق (غير المتصدّع)، lb/in^2 (MPa).

F_b = إجهاد الانعطاف المقبول والمسموح من أجل حالة الانعطاف لوحده، (MPa) lb/in^2.

$$F_a = f'_c (m\, p_g + 1)\, 0.34$$

حمولة الانعطاف المسموحة على الأعمدة التي يتحكم بها الشد تتغير خطياً مع الحمولة المحورية من M_o عندما يكون المقطع في حالة انعطاف بحت إلى M_b عندما تكون الحمولة المحورية N_b.

فمن أجل الأعمدة الحلزونية:

$$M_o = 0.12\, A_{st} f_y\, D_s$$

ومن أجل الأعمدة المربوطة بالأساور:

$$M_o = 0.40\ A_s\ f_y\ (d - d')$$

حيث:

A_{st} = المساحة الإجمالية للتسليح الطولاني، in^2 (mm^2).

f_y = مقاومة الخضوع للتسليح، lb/in^2 (MPa).

D_s = قطر الدائرة المارة من مراكز قضبان التسليح الطولانية، in (mm).

A_s = مساحة تسليح الشد، in^2 (mm^2).

d = المسافة من أبعد ليف مضغوط إلى مركز ثقل تسليح الشد، in (mm)

N_b و M_b الحمولة المحورية وعزم الانعطاف عند الشرط المتوازن (يعني، عندما تساوي اللا تمركزية e إلى e_b كما هو محدد سابقاً). عند هذا الشرط يجب أن يتم تعيين N_b وM_b من:

$$M_b = N_b\ e_b$$

وعندما يكون الانعطاف حول محورين:

$$\frac{M_x}{M_{ox}} + \frac{M_y}{M_{oy}} \leq 1$$

حيث: M_x وM_y عزما الانعطاف حول المحورين x وy، وM_{ox} وM_{oy} قيمتا M_o الانعطاف حول هذين المحورين.

خصائص البيتون في الحالة المقساة

Properties In The Hardened State

المقاومة هي خاصية البيتون التي تشكل في معظم الأحيان محطّ أنظار الجميع.

وتُحدّد عادة بالمقاومة الحدية لعينة نموذجية في حالة الضغط، إلا أنه تكون، في بعض الأوقات، السعة المرونية (قدرة التحمل على الانحناء والعودة إلى الحالة الأولية) أو السعة الشدية، هي المعيار. ولأن البيتون يكتسب المقاومة عادة على امتداد فترة زمنية طويلة، فتكون مقاومة الضغط عند اليوم 28 هي المستخدمة عموماً كقياس لهذه الخاصية.

يمكن أن تُقدّر مقاومة انضغاط البيتون في اليوم 28 من مقاومته في اليوم 7 عن طريق صيغة مقترحة من قبل سلاتر – W.A.Slater:

$$S_{28} = S_7 + 30\sqrt{S_7}$$

حيث:

S_{28} = مقاومة الانضغاط 28 – يوم، lb/in^2 (MPa)

S_7 = مقاومة الانضغاط 7 – يوم lb/in^2 (MPa).

قد تتزايد مقاومة البيتون على نحو لافت للانتباه بعد 28 يوماً، وخصوصاً عندما يتم خلط الإسمنت بالرماد المتطاير. لذا تكون مواصفات المقاومتين في اليومين 56 أو 90 هي الملائمة للتصميم.

تتأثر مقاومة البيتون بصورة أساسية بنسبة الماء/الإسمنت: فأعلى قيمة لهذه النسبة تقابل أخفض قيمة للمقاومة. وبصورة تقريبية تكون هذه العلاقة المتبادلة خطية عندما يتم التعبير عنها باستخدام المتحول C/W، نسبة الإسمنت إلى الماء بالوزن. فمن أجل خلطة جيدة عملياً، بدون استخدام ماء يخفض من مواصفات الخلطة، لدينا

$$S_{28} = 2700\frac{C}{W} - 760$$

إن مقاومة الشد للبيتون أقل بكثير من مقاومته على الضغط، ويكون لها عادةً صلة ضعيفة مع f'_c بغض النظر عن نوعيات التجارب المستخدمة. وكما هو مُحدّد في

التجارب المرونية تكون مقاومة الشد (عامل التمزق أو الانقطاع - وليس المقاومة الحقيقية) حوالي $7\sqrt{f'_c}$ بالنسبة للمواد البيتونية العالية المقاومة و $10\sqrt{f'_c}$ بالنسبة للمواد البيتونية المنخفضة المقاومة.

ويكون معامل المرونة E_C، المستخدم عادة في تصميم البيتون، هو المعامل القاطع أو الخط القاطع (راجع منحني المرونة).

وقد تمّ تعيينه في الصفحة 318 من الـــ ACI تحت عنوان "متطلبات كود البناء الخاصة بالبيتون المسلح" وفق العلاقة؛

$$E_c = w^{1.5} 33\sqrt{f_c'}$$

حيث:

w = كثافة البيتون، lb/ft^3 (kg/m^3)

f_c' = مقاومة الضغط المميزة (النوعية) في اليوم 28، lb/in^2 (MPa).

بالنسبة للبيتون عادي الكثافة، w = 145 lb/ft^3 (kg/m^3)

$$E_c = 57{,}000\sqrt{f_c'}$$

وتتزايد قيمة معامل المرونة مع الزمن كما هو الحال بالنسبة للمقاومة.

Tension Development Lengths طول إرساء قضبان الشد

يتم تعريف الزيادة الأساسية للطول بالنسبة للقضبان والأسْلاك المشدودة وفق المعادلة الآتية الخاصة بالقضبان No.11 والقضبان الأصغر:

$$l_d = \frac{0.04 A_b f_y}{\sqrt{f_c'}}$$

حيث:

A_b = مساحة القضيب، in^2 (mm^2).

f_y = مقاومة الخضوع للقضيب الفولاذي، lb/in^2 (MPa).

$f_c^{'}$ = مقاومة ضغط البيتون في اليوم 28، lb/in^2 (MPa).

ومهما يكن، يجب ألا تقل l_d عن 12 إنش (304.8 mm)، باستثناء حسابات الجدائل الملفوفة أو القطع المرسوّة داخل أي مكان مثبت لها.

ومن أجل القضبان No.14:

$$l_d = 0.085 \frac{f_y}{\sqrt{f_c^{'}}}$$

ومن أجل القضبان No.18:

$$l_d = 0.125 \frac{f_y}{\sqrt{f_c^{'}}}$$

ومن أجل الأسلاك المشوّهة:

$$l_d = 0.03 d_b \frac{f_y - 20{,}000}{\sqrt{f'_c}} \geq 0.02 \frac{A_w}{S_w} \frac{f_y}{\sqrt{f_c^{'}}}$$

حيث:

A_w هي المساحة، in^2 (mm^2). وS_w هي التباعد، in (mm)، للسلك المتزايد بالطول. وباستثناء الحسابات للجدائل الملفوفة أو حسابات زيادة طول قطع التسليح المرسوة، يتوجب على l_d ألا تقل عن 12 إنش (304.8 mm).

أطوال إرساء قضبان الضغط

Compression Development Lengths

يُعرّف التزايد الأساسي للطول l_d، بالنسبة للقضبان المضغوطة، كما يلي:

$$l_d = \frac{0.02 f_y d_b}{\sqrt{f_c'}} \geq 0.003 d_b f_y$$

وبشرط ألا تقل l_d عن 8 إنش (20.3 cm) أو عن $0.0003\ f_y\ d_b$

التحكم بتشققات العناصر المرنة

Crack Control Of Flexural Members

بسبب المخاطرة الناتجة عن التشققات الكبيرة التي تبدأ بالتزايد حالما يخضع التسليح إلى إجهادات عالية، يوصي كود الـــ ACI بأن التصاميم المعتمدة على مقاومة خضوع الفولاذ f_y يجب ألا تزيد عن 80 Ksi (551.6 MPa). وعندما يكون التصميم معتمداً على مقاومة خضوع f_y أكبر من 40 Ksi (275.8 MPa)، فيجب على مساحات المقاطع العرضية التي تتعرض لعزم موجب وسالب أعظميين أن تكون متناسبة فيما بينها لضبط فتحة الشق بحيث تكون الحدود المميزة (للنسبة) محققة بالعلاقة:

$$z = f_s \sqrt[3]{d_c A}$$

حيث:

f_s = الإجهاد المحسوب، Ksi (MPa)، في التسليح تحت تأثير حمولات الخدمة.

d_c = ثخانة الغطاء البيتوني، in (mm)، مقاساً من أبعد سطح مشدود إلى مركز القضيب الأقرب إلى ذلك السطح المشدود.

A = مساحة الشد الفعّالة للبيتون، in^2 (mm)، بالقضيب.

وهذه المساحة يجب أن تؤخذ وكأنها المساحة المحيطة بتسليح الشد الرئيسي ولها مركز ثقل التسليح، مضروبة بنسبة مساحة أكبر قضيب مستخدم إلى المساحة الإجمالية لتسليح الشد.

وهذه الحدود هي $z \le 175$ Kip/in (30.6 KN/mm) من أجل الشقوق المُعرَّضة للداخل و $z \le 145$ Kip/in (25.3 KN/mm) من أجل الشقوق المعرضة للخارج. وهذه القيم تقابل عرض شقوق مُحدّدة بـــ 0.016 إلى 0.013 إنش (0.406 إلى 0.33 mm)، على التوالي، عند حافة شد قصوى تحت تأثير حمولات الخدمة. في معادلة z، يجب أن تُحسب f_s بتقسيم عزم الانعطاف على جداء مساحة الفولاذ بذراع العزم الداخلي، كما يمكن أن تؤخذ f_s كنسبة مئوية تساوي إلى 60 % من مقاومة خضوع الفولاذ بدون أي عملية حسابية.

المقاومة المطلوبة Required Strength

يتطلب كود الـــ ACI، من أجل جملة مركبة من الحمولات، أن يكون للمنشأ وعناصره المقاومات الحدية التالية (السعات الحملية للتصدي لحمولات التصميم وعزومها الداخلية وقواها المتعلقة بها):

بدون تطبيق حمولات الزلازل والرياح:

$$U = 1.4\,D + 1.7\,L$$

حيث:

D = تأثير الحمولة الأساسية المؤلفة من الحمولة الميتة زائد حجم التغير (درجة الحرارة، درجة التقلص).

L = تأثير الحمولة الحية زائد الرص.

وعندما يتم تطبيق حمولات الرياح، فإن أكبر قيمة للمعادلة السابقة والمعادلتين التاليتين تحدد المقاومة المطلوبة:

$$U = 0.75\,(1.4\,D + 1.7\,L + 1.7\,W)$$

$$U = 0.9\,D + 1.3\,W$$

حيث؛

W = تأثير حمولة الريح.

إذا كان من الممكن أن يخضع المنشأ إلى قوى زلزالية E، فعندها عليك أن تستبدل W بـــ 1.1 E في المعادلة الأخيرة.

وفي حال كانت تأثيرات (إجهادات) التوطيد التفاضلي (الغوص بسويات مختلفة للأساسات) أو الزحف أو التقلص (الانكماش) أو تغير درجات الحرارة حرجة على المنشأة، فلابد من إدخالها مع الحمولة الميتة D، والمقاومة يجب أن تساوي على الأقل إلى:

$$U = 0.75\,(1.4\,D + 1.7\,L) \geq 1.4\,(D + T)$$

حيث:

T = التأثيرات المتراكمة لدرجة الحرارة والزحف والانكماش والتوطيد التفاضلي (مناسيب مختلفة للقواعد).

حساب التشوهات والمعايير الخاصة بالجيزان البيتونية

Deflection Computation And Criteria For Concrete Beams

إن فرضيات نظرية إجهادات التشغيل يمكن أن تستخدم أيضاً لحساب التشوهات تحت تأثير حمولات الخدمة؛ بمعنى أنه يمكن استخدام صيغ التشوهات العائدة لنظرية المرونة في الجيزان البيتونية المسلحة. في هذه الصيغ، يُعطى عزم العطالة الفعّال I_e بـــ:

$$I_e = \left(\frac{Mcr}{Ma}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{Mcr}{Ma}\right)^3\right] I_{cr} \le I_g$$

حيث:

I_g = عزم عطالة المقطع البيتوني بمحمله.

Mcr = عزم الانكسار.

Ma = العزم الذي يكون من أجله التشوّه محسوباً.

I_{cr} = عزم عطالة المقطع (المحوّل) البيتوني المنكسر.

إذا ما اعتبرت y_t المسافة من المحور المركزي (المار بمركز الثقل) للمقطع الإجمالي، بغض الطرف عن التسليح، إلى أبعد سطح في حالة الشد، فعندها يمكن أن يُحسب عزم الانكسار من:

$$Mcr = \frac{f_r I_g}{y_t}$$

بعامل تمزّق للبيتون $f_r = 7.5\sqrt{f'_c}$.

وعليه، فإن التشوهات المحسوبة بهذه الطريقة هي تلك التشوهات المفترض أن تحدث مباشرة فور تطبيق الحمولة. أما التشوهات الإضافية مع مرور الزمن فيمكن أن تُقدّر بجداء التشوّه المباشر بـ 2 عندما لا يوجد تسليح ضغط أو بـ $(2 - 1.2\ A'_s/A_s) \ge 0.6$، حيث A'_s مساحة تسليح الضغط وA_s مساحة تسليح الشد.

التصميم بالمقاومة الحدية للجيزان المستطيلة المزودة بتسليح شد فقط

Ultimate - Strength Design Of Rectangular Beams With Tension Reinforcement Only

تُمثّل مساحة تسليح الشد A_s في جائز من البيتون المسلح، عموماً، بالنسبة التالية:

$\rho = A_s/bd$، حيث b عرض الجائز و d المسافة من أبعد سطح ضغط إلى مركز ثقل تسليح الشد. وعند المقاومة الحدية، يكون الفولاذ في المقطع الحرج للجائز قد وصل إلى مقاومة خضوعه f_y إذا لم يفشل البيتون في التصدي للضغط أولاً.

وبالتالي سيكون الشد الإجمالي في الفولاذ: $A_s f_y = \rho f_y bd$.

وتتم مواجهته بقوة ضاغطة مساوية له:

$$0.85 f'_c ba = 0.85 f'_c b \beta_1 c$$

حيث:

f'_c = مقاومة ضغط البيتون في اليوم 28، Ksi (MPa).

a = عمق المقطع المستطيل المكافئ الموزع عليه الإجهاد.

c = المسافة من أبعد سطح ضغط إلى المحور المحايد.

β_1 = ثابت.

وبمساواة الضغط مع الشد في المقطع الحرج ينتج:

$$c = \frac{\rho f_y}{0.85 \beta_1 f'_c} d$$

إن معيار الانهيار بالضغط هو أن يكون الانفعال الأعظمي في البيتون مساوياً لـــ 0.003 إنش/إنش (0.076 mm/mm). وفي تلك الحالة يكون،

$$c = \frac{0.003}{f_s / E_s + 0.003} d$$

حيث:

f_s = إجهاد الفولاذ، Ksi (MPa).

E_s = معامل مرونة الفولاذ = 29,000 Ksi (199.9 GPa).

التسليح المتوازن

يصل البيتون إلى انفعاله الأعظمي 0.003، تحت شروط التوازن، عندما يصل الفولاذ إلى مقاومة خضوعه f_y. يُعيّن هذا نسبة (أمثال مضاعفة) الفولاذ الخاصة بشروط التوازن:

$$\rho_b \frac{0.85\beta_1 f'_c}{f_y} \frac{87{,}000}{87{,}000 + f_y}$$

السعة العزمية

تكون سعة عزم الانعطاف للمقاومة الحدية (العزم الذي تستطيع أن تتحمله المقاومة الحدية) بما يخص الجيزان المسلحة من الأسفل هي:

$$M_u = 0.90[bd^2 f'_c \omega(1 - 0.59\omega)]$$
$$= 0.90\left[A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right)\right]$$

حيث: $\omega = \frac{\rho f_y}{f'_c}$ و $a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c}$

تسليح القص

تساوي سعة القص الحدية V_n لمقطع ما من الجائز إلى مجموع مقاومة القص الاسمية للبيتون V_c ومقاومة القص الاسمية المزودة بالتسليح V_s؛ بمعنى، $V_n = V_c + V_s$. ويجب ألا تتجاوز قوة القص المُحلّلة (إلى مركبات) V_u في المقطع القيمة:

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s)$$

حيث: ϕ = عامل تخفيض السعة (0.85 من أجل القص والشد).

وباستثناء حالة الجيزان المزوّدة بالأكتاف والجيزان الظفرية القصيرة الأخرى، يمكن أن يؤخذ مقطع القص الأعظمي على مسافة تساوي إلى d من وجه المسند.

يجب ألا يتجاوز القص الذي يعبأ به البيتون لوحده القيمة $2\sqrt{f'_c}\, b_w d$، حيث b_w عرض جسد الجائز وd عمق مركز ثقل التسليح. [(أو كحل بديل، يُمكن أن تؤخذ القيمة العظمى لـــ V_C كالتالي:

$$V_C = \left(1.9\sqrt{f'_c} + 2500\rho_w \frac{V_u d}{M_u}\right) b_w d \le 3.5\sqrt{f'_c}\, b_w d$$

حيث: $\rho_w = \dfrac{A_s}{b_w d}$ وV_u وM_u هما القص وعزم الانعطاف في المقطع المعتبر، وM_u يجب ألا تقل عن $V_u d$)].

عندما تكون V_u أكبر من ϕV_c، فعلى القص الزائد أن يُقاوم بتسليح الجسد.

مساحة الفولاذ المطلوبة في الأساور الشاقولية، مقدرة بـــ in^2 (mm^2)، بالإسوارة الواحدة، وبتباعد S، مقدراً بـــ in (mm)، هي:

$$A_v = \frac{V_s S}{f_y d}$$

حيث:

f_y = مقاومة خضوع تسليح القص.

A_v = هي مساحة الأساور مقطوعة بالمستوي الأفقي.

V_s يجب ألا تتجاوز $8\sqrt{f'_c}\, b_w d$ في المقاطع المزودة بتسليح الجسد وf_y يجب ألا تتجاوز 60 Ksi (413.7 MPa).

عندما يكون تسليح القص مطلوباً ومتوضعاً بشكل متعامد مع محور العنصر، فيجب ألا يزيد التباعد عن 0.5 d أو عن 24 إنش (609.6 mm) من c إلى c (من إسوارة إلى أخرى). وعندما تتجاوز V_s المقدار $4\sqrt{f'_c}b_w d$ لابد أن يكون التباعد الأعظمي محدداً بـــ 0.25 d في جميع الأحوال.

والإمكانية البديلة لما سبق، في التصميم العملي، يتحدَّدُ تباعد الإسوارة s، من أجل قص التصميم V_u ومساحة الإسوارة A_v والخصائص الهندسية للعنصر b_w و d، من:

$$s = \frac{A_v \phi f_y d}{V_u - 2\phi\sqrt{f'_c}\, b_w d}$$

وتكون المساحة المطلوبة، عندما يتم ثني قضيب واحد أو جملة من القضبان المتوازية نحو الأعلى وعلى مسافة متساوية من المسند وبزاوية α مع المحور الطولاني للعنصر، هي:

$$A_v = \frac{V_s}{f_y \sin\alpha}$$

والتي يجب ألا تتجاوز فيها V_s المقدار $3\sqrt{f'_c}b_w d$.

A_v هي المساحة المقطوعة بالمستوي الناظمي على محور القضبان.

وتكون المساحة المطلوبة، عندما تكون سلسلة من هذه القضبان منثنية نحو الأعلى عند مسافات مختلفة من المسند أو عندما تستخدم أساور مائلة، هي:

$$A_v \frac{V_s S}{(\text{Sin}\alpha + \text{Cos}\alpha) f_y d}$$

إن مساحة أصغرية من تسليح القص تكون مطلوبة في جميع العناصر الإنشائية، باستثناء البلاطات والأساسات والعوارض النحيفة أو عندما تكون V_u أصغر من $0.5\ V_c$.

إرساء تسليح الشد

لابد أن يمتد، ثلث تسليح العزم الموجب في الجيزان البسيطة وربع تسليح العزم الموجب في الجيزان المستمرة على الأقل، على امتداد وجه العنصر إلى المسند في كلا الحالتين بـــ 6 إنشات (152.4 mm) كحد أدنى إلى داخل المسند.

إن قطر قضبان التسليح، عند المساند البسيطة وفي نقاط الانعطاف (نقاط تغير جهة المنحني)، يجب أن يكون مُحدَّداً بقطر يتحقق عنده طول الامتداد الإضافي (طول الإرساء) l_d

$$l_d = \frac{M_n}{V_u} + la$$

حيث:

M_n = عزم المقاومة المرونية المحسوبة بأخذ جميع فولاذ التسليح في المقطع المُجهد إلى الجهد f_y.

V_u = قوة القص المطبقة في المقطع.

la = طول الإرساء الإضافي إلى ما بعد نقطة الانعطاف أو إلى ما بعد مركز المسند.

وعند أي نقطة انعطاف، تكون l_a مُحدّدة بالقيمة العظمى لـــ d أو بعمق مركز ثقل التسليح أو بـــ 12 مرة من قطر قضيب التسليح.

عُقف القضبان

يُعرّف طول الامتداد الإضافي الأساسي للقضبان المعقوفة ذات الإجهاد، f_y = 60 Ksi (413.7 MPa) بالعلاقة التالية:

$$l_{hb} = \frac{1200 d_b}{\sqrt{f'_c}}$$

حيث:

d_b = قطر القضيب، in (mm).

f'_c = مقاومة ضغط البيتون في اليوم 28، lb/in^2 (MPa).

التصميم بإجهاد التشغيل للجيزان المستطيلة المزودة بتسليح شد فقط

Working-Stress Design Of Rectangular Beams With Tension Reinforcement Only

بدءاً من فرضية أن الإجهاد يتغيّر عبر المقطع العرضي للجائز مع الابتعاد عن المحور المحايد، ينتج أن:

$$\frac{nf_c}{f_s} = \frac{k}{1-k}$$

حيث:

n = النسبة العيارية (القياسية) $\frac{E_s}{E_c}$، و

E_s = معامل مرونة فولاذ التسليح، Ksi (MPa)، و

E_c = معامل مرونة البيتون، Ksi (MPa).

f_c = إجهاد الضغط في أبعد سطح من البيتون، Ksi (MPa).

f_s = الإجهاد في الفولاذ، Ksi (MPa).

k = المسافة من أبعد سطح مضغوط إلى المحور المحايد، in (mm).

وعندما تكون النسبة الفولاذية $\rho = \frac{A_s}{bd}$ معلومة، حيث A_s = مساحة تسليح الشد مقدرة بـ in^2 (mm^2) و b = عرض الجائز مقدرة بـ in (mm)، d = المسافة من

أبعد سطح مضغوط إلى مركز ثقل التسليح، in (mm). فيمكن أن يتم حساب k من:

$$k = \sqrt{2n\rho + (n\rho)^2} - n\rho$$

وحيثما كان فولاذ العزم الموجب مطلوباً، توجَّب على ρ ألا تقل عن $\frac{200}{f_y}$، حيث f_y إجهاد خضوع الفولاذ. ويمكن أن يتم الحصول على المسافة jd بين مركز ثقل الضغط ومركز ثقل الشد مقدرة بـــ in (mm)، من العلاقة:

$$j = 1 - \frac{k}{3}$$

عزم الانعطاف المقبول

عزم مقاومة البيتون، in.kip(k.Nm):

$$M_c = \frac{1}{2} f_c kjbd^2 = K_c bd^2$$

حيث:

$$K_c = \frac{1}{2} f_c kj$$

وعزم مقاومة الفولاذ:

$$M_s = f_s A_s jd = f_s \rho j b d^2 = K_s b d^2$$

حيث:

$$K_s = f_s \rho j$$

القص المقبول

إن إجهاد واحدة القص الاسمية الفاعلة، في المقطع الذي تؤثر عليه قوة القص V، هي:

$$v = \frac{V}{bd}$$

وإجهادات القص المسموحة تساوي لـــ 55 % من تلك الإجهادات العائدة لمقاومة التصميم الحدية. وبعيداً عن ذلك، تكون التصاميم على القص بطريقتي إجهاد التشغيل والمقاومة الحدية نفسها. باستثناء الجيزان المكتفة والأظفار القصيرة الأخرى، يمكن أن يؤخذ المقطع الخاضع لقص أعظمي على مسافة تساوي d من وجه المسند. في حالة التصميم بإجهاد التشغيل، يجب ألا يتجاوز إجهاد القص v_c الذي يتحمله البيتون لوحده المقدار $1.1\sqrt{f'_c}$. (وكحل بديل آخر، يمكن أن تؤخذ القيمة العظمى لـــ v_c مساوية لـــ $\sqrt{f'_c} + 1300\rho Vd / M$، بقيمة عظمى $1.9\sqrt{f_c}$، حيث f'_c مقاومة الضغط للبيتون في اليوم 28 مقدرة بـــ lb/in^2 (MPa)، و M عزم الانعطاف المؤثر في المقطع ولا يقل عن Vd).

في المقطع الذي يتجاوز فيه الإجهاد الفتلي v_t المقدار $0.825\sqrt{f'_c}$، يتوجب عندئذ على v_c ألا تتجاوز:

$$v_c = \frac{1.1\sqrt{f'_c}}{\sqrt{1 + (v_t / 1.2v)^2}}$$

ويتوجب على القص الزائد $v - v_c$ ألا يتجاوز $4.4\sqrt{f'_c}$ في المقاطع المزودة بتسليح الجسد. ويجب على الأساور والقضبان المثنية أن تكون قادرة على مقاومة القص الزائد $V' = V - v_c bd$.

المساحة المطلوبة في الأضلاع الشاقولية للإسوارة، مقدرة بـــ in^2 (mm^2)، هي:

$$A_v = \frac{V's}{f_v d}$$

حيث:

s = تباعد الأساور، in (mm).

f_v = الإجهاد المسموح في فولاذ الإسوارة، lb/in^2 (MPa).

ومن أجل قضيب واحد مثني أو جملة من القضبان المتوازية المثنية نحو الأعلى بزاوية α مع المحور الطولاني وعلى بعد متساوي من المسند، تكون المساحة المطلوبة:

$$A_v = \frac{V'}{f_v Sin\alpha}$$

ومن أجل أساور مائلة وجملة من القضبان المثنية للأعلى وعلى مسافات مختلفة من المسند، تكون المساحة المطلوبة:

$$A_v = \frac{V_s'}{f_v d(Sin\alpha + Cos\alpha)}$$

تُوزَّع الأساور الفائضة، عن تلك الأساور المطلوبة، على كل جانب من نقطتي الإيقاف بتباعد (أو بمسافة) يساوي إلى 75 % من العمق الفعّال للعنصر. مساحة وتباعد الأساور الفائضة يجب أن يحققا:

$$A_v \geq 60 \frac{b_w s}{f_y}$$

حيث

A_v = مساحة المقطع العرضي للإسوارة، in^2 (mm^2)

b_w = عرض الجسد، in (mm)

s = تباعد الإسوارة، in (mm)

f_y = مقاومة الخضوع لفولاذ الإسوارة، lb/in^2 (MPa).

يجب ألا يتجاوز تباعد الأساور s المقدار $d/8\ \beta_b$، حيث β_b هي نسبة مساحة القضبان عند نقطة الإيقاف (للأساور) على المساحة الإجمالية لقضبان الشد في المقطع و d هي العمق الفعّال للعنصر.

التصميم بالمقاومة الحدية للجيزان المستطيلة المزوّدة بقضبان ضغط.

Ultimate-Strength Design Of Rectangular Beams With Compression Bars

إن سعة عزم الانعطاف لجائز مستطيل مزود بفولاذ الشد والضغط معاً، هي:

$$M_u = 0.90\left[(A_s - A'_s)f_y\left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_s f_y (d - d')\right]$$

حيث:

a = عمق المستطيل المكافئ لتوزيع إجهاد الضغط ويساوي:

$$a = (A_s - A'_s)\, f_y/f'_c\, b \text{ , in (mm)}$$

b = عرض الجائز، in (mm).

d = المسافة من أبعد سطح مضغوط إلى مركز ثقل فولاذ الشد، in (mm).

d' = المسافة من أبعد سطح مضغوط إلى مركز ثقل فولاذ الضغط، in (mm).

A_s = مساحة فولاذ الشد، in^2 (mm^2)

A'_s = مساحة فولاذ الضغط، in (mm^2).

f_y = مقاومة خضوع الفولاذ، Ksi (MPa).

f'_c = مقاومة البيتون في اليوم 28، Ksi (MPa).

ويصحّ هذا، فقط عندما يصل ضغط الفولاذ إلى f_y ويحدث هذا عندما:

$$(\rho - \rho') \geq 0.85\beta_1 \cdot \frac{f'_c d'}{f_y d} \cdot \frac{87{,}000}{87{,}000 - f_y}$$

حيث:

$\rho = \frac{A_s}{bd}$.

$\rho' = \frac{A'_s}{bd}$.

β_1 = ثابت.

التصميم بإجهاد التشغيل للجيزان المستطيلة المزودة بقضبان ضغط

Working-Stress Design Of Rectangular Beams With Compression Bars

يمكن أن تستخدم الصيغ التالية في التصميم وذلك بالاستناد على أن تغيّر الإجهاد والانفعال بالابتعاد عن المحور المحايد يكون خطياً.

$$k = \frac{1}{1 + f_s / nf_c}$$

حيث:

f_s = الإجهاد في فولاذ الشد، Ksi (MPa).

f_c = الإجهاد في أبعد سطح مضغوط، Ksi (MPa).

n = النسبة العيارية (القياسية)، $\frac{E_s}{E_c}$

$$f_s' = \frac{kd - d'}{d - kd} 2f_s$$

حيث:

f_s' = الإجهاد في الفولاذ المضغوط، Ksi (MPa).

d = المسافة من أبعد سطح مضغوط إلى مركز ثقل فولاذ الشد، in (mm).

d' = المسافة من أبعد سطح مضغوط إلى مركز ثقل فولاذ الضغط، in (mm).

الأمثال (العامل) 2 أدخل في المعادلة السابقة وفقاً لـ ACI 318 "متطلبات كود البناء الخاصة بالبيتون المسلح"، ليوضح تأثيرات الزحف وعدم خطية مخطط الإجهاد - الانفعال للبيتون. ومهما يكن، يجب على f_s ألا تتجاوز إجهاد الشد المسموح للفولاذ.

ولأن قوى الضغط الإجمالية تساوي قوى الشد الإجمالية على المقطع، فيكون:

$$C = C_c + C'_s = T$$

حيث:

C = الضغط الإجمالي على المقطع العرضي للجائز، Kip (N).

C_c = الضغط الإجمالي على مقطع البيتون، Kip (N).

C'_s = القوة الفاعلة على الفولاذ المضغوط، Kip (N).

T = القوة الفاعلة على الفولاذ المشدود، Kip (N).

$$\frac{f_s}{f_c} = \frac{k}{2[\rho - \rho'(kd - d')/(d - kd)]}$$

حيث:

$\rho = \frac{A_s}{bd}$ و $\rho' = \frac{A'_s}{bd}$.

ومن أجل مراجعة التصميم، يمكن استخدام الصيغ التالية:

$$k = \sqrt{2n\left(\rho + \rho'\frac{d'}{d}\right) + n^2(\rho + \rho')^2} - n(\rho + \rho')$$

$$\overline{z} = \frac{(k^3 d/3) + 4n\rho' d'[k - ('d/d)]}{k^2 + 4n\rho'[k - ('d/d)]} \quad ، \quad jd = d - \overline{z}$$

حيث: jd المسافة بين مركز ثقل فولاذ الضغط ومركز ثقل فولاذ الشد.

والعزم المقاوم لفولاذ الشد هو:

$$M_s = Tjd = A_s f_s jd \quad ، \quad f_s = \frac{M}{A_s jd}$$

حيث: M عزم الانعطاف في المقطع المدروس من الجائز.

وعزم مقاومة الضغط:

$$M_c = \frac{1}{2} f_c jbd^2 \left[k + 2n\rho' \left(1 - \frac{d'}{kd} \right) \right]$$

$$f_c = \frac{2M}{jbd^2 \{k + 2n\rho'[1 - (d'/kd)]\}}$$

تتوفر برمجيات الكومبيوتر من أجل الحسابات السابقة، إلا أن كثيراً من المصممين يفضّلون الصيغ التقريبية التالية على أي حال:

$$M_1 = \frac{1}{2} f_c bkd \left(d - \frac{kd}{3} \right)$$

$$M'_s = M - M_1 = 2f'_s A'_s (d - d')$$

حيث:

M = عزم الانعطاف

M'_s = سعة المقاومة العزمية لفولاذ الضغط.

M_1 = سعة المقاومة العزمية للبيتون.

التصميم بالمقاومة الحدية للجيزان T و I

Ultimate - Strength Design Of I And T Beams

في حال وقوع المحور المحايد ضمن الشفة (جناح المقطع)، عندها يمكن أن يُصمم العنصر كجائز ذي مقطع مستطيل بعرض فعّال b وعمق d. ولكي يتحقق ذلك الشرط، لابد أن تكون ثخانة الشفة t (الجناح أو الفلنجة) أكبر من المسافة c من أبعد سطح مضغوط إلى المحور المحايد،

$$c = \frac{1.18\omega d}{\beta_1}$$

حيث

β_1 = ثابت

$\omega = \frac{A_s f_y}{bdf'_c}$

A_s = مساحة فولاذ الشد، in^2 (mm^2).

f_y = مقاومة خضوع الفولاذ، Ksi (MPa).

f'_c = مقاومة البيتون في اليوم 28، Ksi (MPa).

وعندما يقع المحور المحايد ضمن الجسد، يجب ألا يتجاوز العزم الحدّي:

$$M_u = 0.90\left[(A_s - A_{sf})f_y\left(d - \frac{a}{2}\right) + A_{sf} f_y\left(d - \frac{t}{2}\right)\right]$$

حيث:

A_{sf} = مساحة فولاذ الشد المطلوبة لتنمية مقاومة ضغط الشفة البارزة أو الناتئة عن طرفي الجسد، وتساوي: in^2 (mm^2)، $A_{sf} = 0.85\,(b - b_w)\,tf'_c/f_y$

b_w = عرض الجسد أو جذع الجائز، in (mm)

a = عمق المقطع المستطيل المكافئ لتوزع إجهاد الضغط، in (mm)، ويساوي:

$$a = (A_s - A_{sf})\, f_y / 0.85\, f'_c\, b_w$$

ويجب ألا تتجاوز الكمية $\rho_w - \rho_f$ المقدار $0.75\ \rho_b$، حيث ρ_b هي أمثال الفولاذ الخاصة بشروط التوازن، $\rho_w = \frac{A_s}{b_w d}$ و $\rho_f = \frac{A_{sf}}{b_w d}$.

التصميم بإجهاد التشغيل للجيزان I و T

Working-Stress Design Of I And T Beams

يُعيَّن العرض الفعّال للجناح المضغوط في الجيزان T وفق نفس قوانين التصميم بالمقاومة الحديّة. وقد تحدث أيضاً، بالنسبة لطريقة التصميم بإجهاد التشغيل، الحالتان: احتمال وقوع المحور المحايد إما في الشفة (الجناح) أو في الجسد. (بما يخص العزم السالب، يجب أن يُصمم الجائز T كجائز مستطيل بعرض b يساوي إلى عرض ذلك الجسد للجائز T).

فإذا كان المحور المحايد واقعاً في الشفة، فيمكن أن يُصمَّم الجائز T أو I كجائز مستطيل بعرض فعّال b. وإذا كان المحور المحايد واقعاً في الجسد أو الجذع، فيمكن أن يُصمم الجائز T أو I وفق الصيغ التالية، التي تتجاهل الضغط في الجذع كما هو مُتبَّع عادة:

$$k = \frac{d}{1 + f_s / n f_c}$$

حيث:

k = المسافة من أبعد سطح مضغوط إلى المحور المحايد، in (mm).

d = المسافة من أبعد سطح مضغوط إلى مركز ثقل فولاذ الشد، in (mm).

f_s = الإجهاد في فولاذ الشد، Ksi (MPa).

f_c = الإجهاد في البيتون عند أبعد سطح مضغوط، Ksi (MPa)

n = النسبة العيارية = $\frac{E_s}{E_c}$.

ولأن قوة الضغط الإجمالية C تساوي إلى قوة الشد الإجمالية T، يكون:

$$C = \frac{1}{2} f_c (2kd - t) \frac{bt}{kd} = T = A_s f_s$$

$$kd = \frac{2ndA_s + bt^2}{2nA_s + 2bt}$$

حيث:

A_s = مساحة فولاذ الشد، in^2 (mm^2).

t = ثخانة الجناح (سماكة الشفة)، in (mm).

المسافة بين مركز ثقل المساحة في حالة الضغط ومركز ثقل فولاذ الشد هي؛

$$\bar{z} = \frac{t(3kd - 2t)}{3(2kd - t)} \quad ; \quad jd = d - \bar{z}$$

العزم المقاوم للفولاذ هو:

$$M_s = Tjd + A_s f_s jd$$

والعزم المقاوم للبيتون هو:

$$M_c = Cjd = \frac{f_c btjd}{2kd}(2kd - t)$$

يمكن أن يتم تقريب M_s وM_c، في التصميم، بالعلاقتين:

$$M_s = A_s f_s \left(d - \frac{t}{2} \right)$$

$$M_c = \frac{1}{2} f_c bt\left(d - \frac{t}{2}\right)$$

المشتقتين باستبدال jd بـ d - t/2 وf_c (1-t/2kd) بـ $f_c/2$، عن طريق إجهاد الضغط المتوسط المؤثر على المقطع.

التصميم بالمقاومة الحدية بالنسبة لعزم الفتل

Ultimate-Strength Design For Torsion

عندما يكون الفتل الحدّي (الأقصى) T_u أقل من القيمة المحسوبة من معادلة T_u الآتية، عندها يجب أن تكون المساحة A_v لتسليح القص على الأقل:

$$A_v = 50\frac{b_w s}{f_y}$$

وعلى أي حال، عندما يتجاوز الفتل الحدّي قيمة T_u المحسوبة من معادلة T_u الآتية، وحيث أنّ تسليح الجسد يكون مطلوباً إمّا اسمياً أو بالحساب، عندئذٍ تكون المساحة الأصغرية المطلوبة للأساور المغلقة هي:

$$A_v + 2A_t = \frac{50 b_w s}{f_y}$$

حيث: A_t هي مساحة أحد أضلاع الإسوارة المغلقة المقاومة للفتل ضمن مسافة s.

يجب أن يتم أخذ تأثيرات (إجهادات) الفتل بالاعتبار كلما تجاوز الفتل الحدي:

$$T_u = \phi\left(0.5\sqrt{f'_c}\,\Sigma x^2 y\right)$$

حيث:

ϕ = عامل تخفيض السعة = 0.85

T_u = عزم الفتل التصميمي الحدي.

$\sum x^2 y$ = مجموع جداء أقصر ضلع بأطول ضلع لكل مستطيل من المستطيلات المركبة* للمقطع (عندما يكون المقطع T قيد التطبيق، فيجب ألا يتجاوز عرض الشفة البارزة المستخدمة في التصميم ثلاث مرات من سماكتها)

يجب ألا يتجاوز الفتل T_c الذي يعبأ به البيتون لوحده المقدار:

$$T_c = \frac{0.8\sqrt{f'_c}\sum x^2 y}{\sqrt{1+(0.4V_u/C_t T_u)^2}}$$

حيث:

$$C_t = b_w d / \sum x^2 y$$

يجب أن يتم حساب تباعد الأساور المغلقة الخاصة بالفتل من:

$$s = \frac{A_t \phi f_y \alpha_t x_1 y_1}{(T_u - \phi T_c)}$$

حيث؛

A_t = مساحة أحد أضلاع الإسوارة المغلقة.

$\alpha_t = 0.66 + 0.33\frac{y_1}{x_1}$ ولا تزيد عن 1.50.

f_y = مقاومة خضوع تسليح الفتل.

x_1 = أقصر بعد من c إلى c لأضلاع الإسوارة المغلقة.

y_1 = أطول بعد من c إلى c لأضلاع الإسوارة المغلقة.

ومهما يكن، يجب ألا يتجاوز تباعد الأساور المغلقة $\frac{x_1 + y_1}{4}$ أو 12 إنش (304.8 mm).

---

* مثلاً، في حالة المقطع ـــــا لدينا ثلاثة مستطيلات مركبة للمقطع، والمجموع $\sum x^2 y$ سيتألف بالتالي من ثلاثة حداءات. (المعدّ).

ويجب أن يمتد تسليح الفتل على الأقل مسافة تساوي d + b إلى ما بعد النقطة التي ينتهي عندها هذا التسليح نظرياً، حيث b عرض الجائز.

يجب أن يتم وضع قضيب طولاني واحد على الأقل في كل زاوية للأساور.

ويجب أن يكون قياس القضبان الطولانية No.3 على الأقل، والتباعد فيما بينها حول محيط الإسوارة يجب ألا يتجاوز 12 إنش (304.8 mm).

وتكون القضبان الطولانية الأكبر من القياس No.3 مطلوبة، وذلك إذا ما تمّ تحديدها من أكبر قيمة لـــ Al المحسوبة من المعادلتين التاليتين:

$$Al = 2A_t \frac{x_1 + y_1}{s}$$

$$Al = \left[\frac{400xs}{f_y}\left(\frac{T_u}{T_u + \frac{V_u}{3C_t}}\right) - 2A_t\right]\left(\frac{x_1 + y_1}{s}\right)$$

في المعادلة الثانية من المعادلتين السابقتين يمكن استبدال $2A_t$ بـــ $\frac{50b_w s}{f_y}$.

إن عزم الفتل المسموح الأعظمي هو:

$$T_u = \phi\, 5\, T_c$$

التصميم بإجهاد التشغيل بالنسبة لعزم الفتل

Working-Stress Design For Torsion

لابد من اعتبار تأثيرات (إجهادات) عزم الفتل كلما نتج فتل T عن حمولات خدمة وكان يتجاوز المقدار:

$$T = 0.55\left(0.5f'_c \sum x^2 y\right)$$

حيث:

$\sum x^2y$ = مجموع جداء مربع أقصر ضلع بأطول ضلع لكل مستطيل من المستطيلات المركبة للمقطع. إجهاد الفتل المسموح على البيتون يساول لـ 55 % من ذلك المحسوب من معادلة T_c السابقة. يجب أن يُحسب التباعد بين الأساور المغلقة الخاصة بالفتل من:

$$s = \frac{3A_t \alpha_t x_1 y_1 f_v}{(v_t - v_{tc})\sum x^2 y}$$

حيث:

A_t = مساحة أحد أضلاع الإسوارة المغلقة.

$\alpha_t = 0.66 + \frac{0.33y_1}{x_1}$، ولا تزيد عن 1.50

v_{tc} = إجهاد الفتل المسموح على البيتون.

x_1 = البعد الأقصر من c إلى c لأضلاع الإسوارة المغلقة.

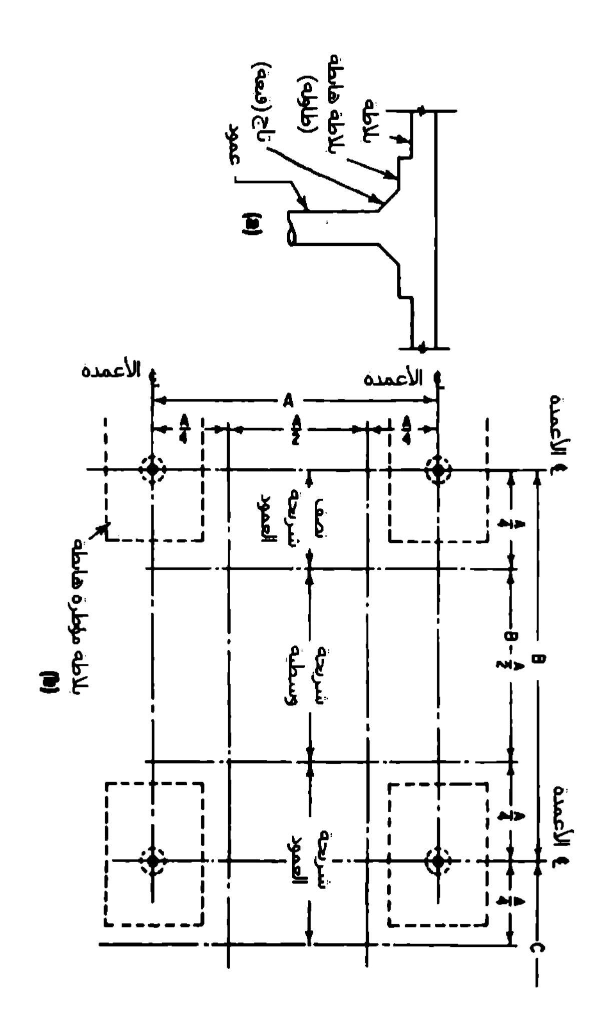
y_1 = البعد الأطول من c إلى c لأضلاع الإسوارة المغلقة.

إنشاء البلاطات المسطحة Flat-Slab Construction

تُسمى البلاطات المستندة مباشرة على الأعمدة، دون جيزان أو جسور رئيسية، بالبلاطات الفطريّة أو المُسطّحة – FLAT-SLABS. وبصورة عامة، تنفرج الأعمدة بالاتساع (مثل البوق) في قمم تيجانها في هذا النوع من البلاطات (شكل 5.3).

وعلى أي حال، يُعتبر ذلك الجزء فقط، من المخروط المقطوع والمقلوب والمُشكّل بحيث يقع ضمن زاوية رأس مخروط تساوي 90°، فعّالاً في مقاومة الإجهاد.

أحياناً، يزوّد تاج العمود الخارجي بكتف قوسي داعم على الوجه الداخلي للعمود.



الشكل 5.3 بلاطة بيتونية مسطحة.

(a) مقطع شاقولي، مار من البلاطة الهابطة والعمود، عند المسند.

(b) مشهد أفقي يُحدّد تقسيمات البلاطة إلى شرائح للأعمدة وشرائح وسطية.

يمكن أن تكون البلاطة مليئة أو مجوّفة بصناديق من القرميد أو مفرّغة بقوالب صب خاصة بهذا النوع من البلاطات. وتكون عادةً البلاطات المفرّغة أكثر الأنواع اقتصادية بالنسبة للمجازات الطويلة بالرغم من أن تكلفة القالب في هذا النوع من البلاطات قد تتجاوز تكلفة قوالب البلاطات المليئة. فالقوالب المفرغة للبلاطة تقوم بحذف كمية كبيرة من البيتون الموجود في منطقة الشد الذي يُعتبر بلا فاعلية في مقاومة الإجهادات.

يُثبّت كود الـ ACI الثخانات الأصغرية لضبط التشوّه وفق ما هو مُحدَّد بالمعادلات التالية:

$$h = \frac{l_n (0.8 + f_y / 200{,}000)}{36 + 5\beta[\alpha_m - 0.12(1 + 1/\beta)]} \geq \frac{ln(0.8 + f_y / 200{,}000)}{36 + 9\beta}$$

حيث:

h = ثخانة البلاطة، in (mm)

l_n = طول المجاز النظيف (الداخلي) بالاتجاه الطويل للبلاطة، in (mm).

f_y = مقاومة خضوع التسليح، Ksi (MPa).

β = نسبة المجاز النظيف بالاتجاه الطويل على المجاز النظيف بالاتجاه القصير.

α_m = القيمة الوسطية لـ α الخاصة بكل الجيزان الموجودة على حواف البلاطة.

α = نسبة الصلابة المرونية ($E_{cb}\ I_b$) لمقطع الجائز على الصلابة المرونية ($E_{cs}\ I_s$) لعرض البلاطة المحدودة به جانبياً بخط مركز البلاطة (المحدودة) المجاورة، إن وجدت، على كل جانب من الجائز.

E_{cb} = عامل مرونة البيتون في الجائز.

E_{cs} = عامل مرونة البيتون في البلاطة.

I_b = عزم العطالة حول المحور المار بمركز ثقل المقطع الخامي (الإجمالي) للجائز، الذي يتضمن ذلك الجزء من البلاطة على كل من طرفي الجائز والممتد إلى مسافة تساوي إلى بروز الجائز فوق أو تحت البلاطة، والذي يكون (ذلك الجزء) في جميع الأحوال أكبر من ثخانة البلاطة ولكن لا يزيد عن أربع مرات من سماكتها.

I_s = عزم العطالة حول المحور المار بمركز ثقل المقطع الخامي (الإجمالي) للبلاطة ويساوي $\frac{h^3}{12}$ مرة من عرض البلاطة المحددة في تعريف α.

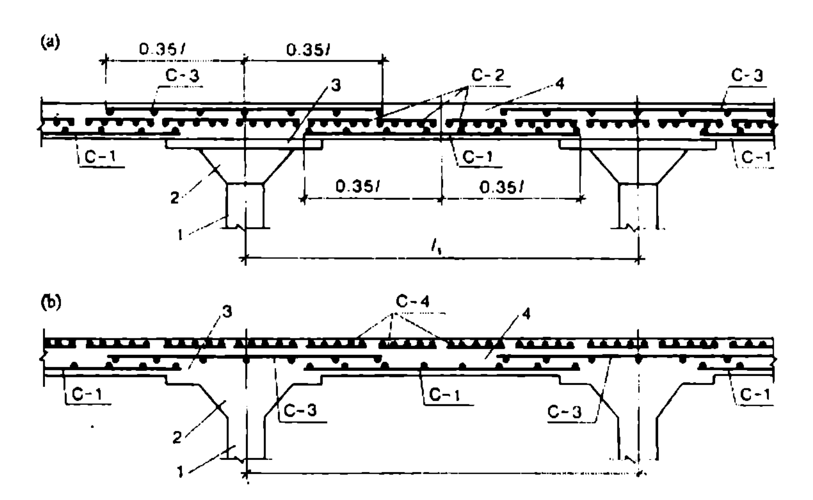
مهما يكن، لا تزيد ثخانة البلاطة عن: $(l_n/36)\,(0.8 + f_y/200.000)\,(36/l_n)$

إنشاء الصفائح المسطحة Flat-Plate Construction

تدعى البلاطات المسطحة – Flat Slabs ذات الثخانة الثابتة بين المساند بالصفائح المسطحة flat - plates. وتكون، بصورة عامة، القبعات أو التيجان محذوفة من الأعمدة.

التصميم أو التحليل الدقيق للبلاطات المسطحة أو الصفائح المسطحة مُعقّد جداً. ويكون التصّرف العملي الشائع استخدام الطرق التقريبية. يقدم كود الـ ACI طريقتين من هذا النحو: طريقة التصميم المباشر وطريقة الهيكل المكافئ.

في كلا الطريقتين، تُعتبر البلاطة المسطحة مؤلفة من شرائح متوازية مع خطوط الأعمدة في اتجاهين متعامدين. وتمتد شريحة العمود في كل اتجاه بمجاز بين عمودين ويكون لها عرض ربع أقصر المجازين المتعامدين على كل طرف من خط مركز العمود. وجزء البلاطة الواقع بين شرائح الأعمدة المتوازية ضمن كل طاولة محدّدة بأربعة أعمدة (البلاطة المحددة بأربع زوايا أو أربعة أعمدة تدعى طاولة – Panel) يدعى بالشريحة الوسطى (انظر الشكل 5.3).

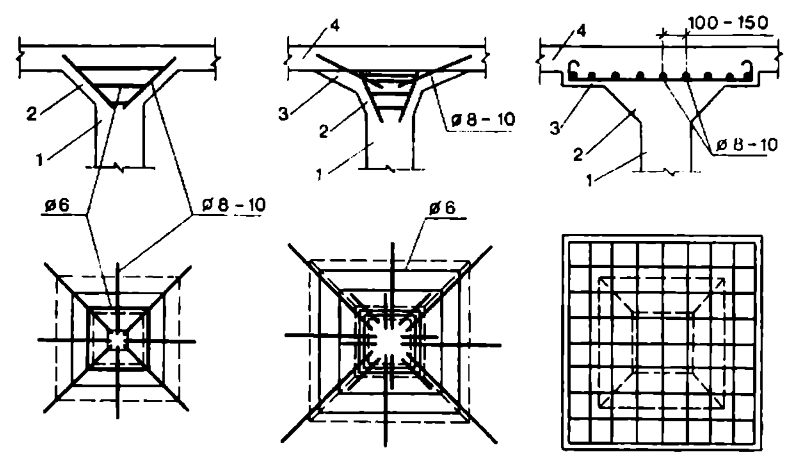


مثال نموذجي من بلاطة مسطحة مصبوبة في الحقل

(a) مقطع مار من منتصف مجاز البلاطة.

(b) مقطع مار من مراكز الأعمدة.

1) عمود. 2) التاج. 3) الجزء الموسّع من تاج العمود. 4) البلاطة.



تسليح تيجان الأعمدة في البلاطة المسطحة.

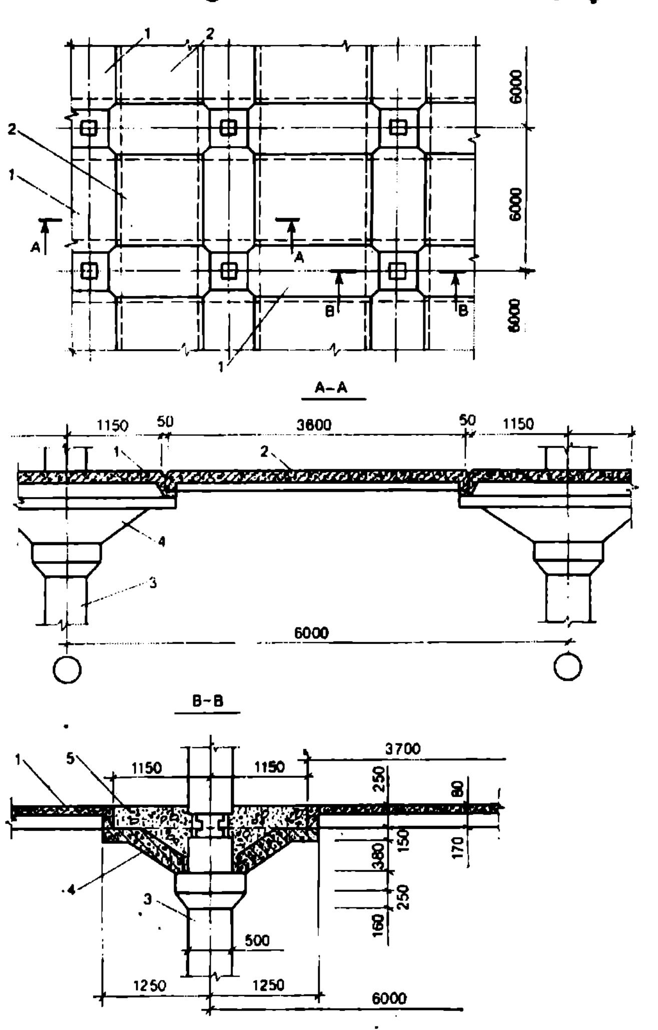
1) العمود 2) التاج 3) الجزء الموسّع من التاج 4) البلاطة

طريقة التصميم المباشر

يمكن أن تستخدم هذه الطريقة عندما تكون جميع الشروط التالية موجودة:

- للبلاطة ثلاث تقسيمات أو أكثر في كل اتجاه.
- نسبة الطول إلى العرض للطاولة تساوي إلى 2 أو أقل.
- الحمولات موزعة بانتظام فوق الطاولة.
- نسبة الحمولة الحية إلى الحمولة الميتة تساوي إلى 3 أو أقل.
- تشكل الأعمدة بصورة تقريبية شبكة من المستطيلات بانحياد أو انحراف أعظمي (10 %).
- لا تختلف المجازات المتتالية في كل اتجاه بأكثر من ثلث أطول مجال.

مثال نموذجي من بلاطة مسطحة (فطرية) مسبقة الصنع



بلاطة فطرية مسبقة الصب 1) بلاطة مُسقَطَة 2) البلاطة 3) العمود
4) تجويف نواة التاج 5) بيتون مصبوب في الحقل

وعندما تكون الطاولة مستندة على جيزان في كل الأطراف، تحقق الصلابة النسبية للجيزان المتراجحة:

$$0.2 \leq \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 \leq 5$$

حيث:

α_1 = α وفق اتجاه l_1

α_2 = α وفق اتجاه l_2

α = الصلابة النسبية للجائز المُعرفة في المعادلة السابقة.

l_1 = المجاز في الاتجاه الذي تكون فيه العزوم معينة، من C إلى C للمساند.

l_2 = المجاز المتعامد مع l_1، من C إلى C للمساند.

المعادلة الأساسية المستخدمة في التصميم المباشر هي طريقة العزم التصميمي الاستاتيكي الإجمالي في شريحة محددة طرفياً بخط مركز الطاولة على جانبي خط مركز المساند.

$$M_o = \frac{W l_2 l_n^2}{8}$$

حيث:

W = حمولة التصميم المنتظمة بواحدة مساحة البلاطة.

l_n = المجاز النظيف (الداخلي = من الوجه إلى الوجه) وفق اتجاه العزوم المعينة.

يجب أن تُصمم الشريحة ذات العرض l_2 بالنسبة لعزوم الانعطاف التي من أجلها يساوي مجموع القيم المطلقة لعزم الانعطاف الموجب ومتوسط عزم الانعطاف السالب، في كل مجاز، إلى M_o أو يكبرها.

1. يجب أن يحقق مجموع الصلابات المرونية للأعمدة فوق وتحت البلاطة Σk_c،

$$\alpha_c = \frac{\sum K_c}{\sum (K_s + K_b)} \geq \alpha_{min}$$

حيث

K_c = الصلابة المرونية للعمود = $E_{cc} I_c$ و

E_{cc} = عامل مرونة بيتون العمود.

I_c = عزم العطالة حول المحور المار بمركز ثقل المقطع الخامي للعمود.

$K_s = E_{cs} I_s$

$K_b = E_{cb} I_b$

α_{min} القيمة الصغرى لـــ α_c ، كما تُعطى في الكتب الهندسية المساعدة.

2. إذا لم تحقق الأعمدة الشرط 1 فيجب أن تُضرب عزوم التصميم الموجبة، في الطاولات البيتونية، بالعامل (الأمثال) العددي:

$$\delta_s = 1 + \frac{2 - \beta_a}{4 + \beta_a}\left(1 - \frac{\alpha_c}{\alpha_{min}}\right)$$

القص في البلاطات Shear In Slabs

يجب أن يتم اختبار البلاطات بما يخص القص أيضاً، وذلك من أجل القص الجائزي (beam-type) والقص التثقيــبي (Punching sheard). فتعتبر البلاطة جائزاً مستطيلاً رقيقاً وعريضاً في حالة القص الجائزي. ويجب أن يؤخذ المقطع الحرج بما يخص الشد القطري على مسافة من وجه العمود أو قبعته مساوية إلى العمق الفعّال d للبلاطة. ويمتد المقطع الحرج عبر كامل عرض البلاطة b. ويجب ألا يتجاوز، عبر هذا المقطع، إجهاد القص الاسمي v_u على البيتون المسلح السعة الحدية $2\sqrt{f'_c}$ أو

إجهاد التشغيل المسموح $1.1\sqrt{f'_c}$، حيث f'_c مقاومة ضغط البيتون في اليوم 28 مقدرة بـــ lb/in^2 (MPa).

يمكن أن يحدث القص التثقيبي عبر عدة مقاطع تلتف بشكل مكتمل حول المسند، مثلاً، حول وجه العمود أو قبعة العمود أو حول الطاولة الهابطة.

ويحدث المقطع الحرج عند مسافة d/2 من أوجه المساند، حيث d العمق الفعّال للبلاطة أو للطاولة الهابطة. يجب أن يعتمد تصميم القص التثقيبـــي على:

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s)$$

حيث:

ϕ = عامل تخفيض السعة (ويساوي إلى 0.85 بالنسبة للقص والفتل)، وذلك بأخذ مقاومة قص V_n لا تزيد عن مقاومة البيتون V_c المحسوبة من:

$$V_c = \left(2 + \frac{4}{\beta_c}\right)\sqrt{f'_c}\, b_o d \le 4\sqrt{f'_c}\, b_o d$$

حيث: b_o = محيط المقطع الحرج، β_c = نسبة الضلع الطويل على الضلع القصير للمقطع الحرج.

على أي حال، إذا ما تم إضافة تسليح القص فيمكن أن يزداد القص المسموح بقيمة أعظمية = 50 % من قيمته إذا ما استخدم تسليح قص مؤلف من قضبان، ويمكن أن يزداد (القص المسموح) بقيمة أعظمية = 75 % من قيمته إذا ما استخدمت رؤوس قص مؤلفة من زوجين من الفولاذ المشكّل وفق هذه الرؤوس.

عموماً، يتألف تسليح قص البلاطات من قضبان مثنية ويُصمّم بالتوافق مع إمدادات الجيزان بمقاومة قص البيتون عند المقاطع الحرجة المساوية لـــ $2\sqrt{f'_c}\, b_o d$ عند الوصول إلى المقاومة الحدية و $V_n \le 6\sqrt{f'_c}\, b_o d$.

لا بد من أخذ الحذر الشديد للتأكد من أن تسليح القص قد وضع في مكانه على نحو دقيق وأرسي بالطريقة المناسبة، خاصةً في البلاطات الرقيقة.

عزوم الأعمدة Column Moments

الاعتبار الهام الآخر في تصميم أنظمة البلاطات ذات الاتجاهين، هو انتقال العزوم إلى الأعمدة. ويشكل هذا، بصورة عامة، شرطاً حرجاً عند حواف الأعمدة، حيث يكون عزم البلاطة اللامتوازن كبيراً جداً بسبب الطاولة ذات الطرف الواحد.

فيُعتبر عزم البلاطة اللامتوازن منقولاً جزئياً إلى العمود بالاتصال المرن عبر المقطع الحرج الذي يبعد بمقدار $d/_2$ من الحافة الخارجية للعمود، ومنقولاً جزئياً إلى العمود عن طريق قوى القص اللامركزية (اللامحورية) الفاعلة حول مركز ثقل المقطع الحرج.

ويُعطى ذلك الجزء من عزم البلاطة اللا متوازن M_u المنقول عن طريق لا تمركزية القص بـــ $\gamma_V M_u$:

$$\gamma_V = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{2}{3}\right)\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}}$$

حيث:

b_1 = عرض، مقدراً بـــ in (mm)، المقطع الحرج في اتجاه المجاز الذي من أجله تكون عزوم الانعطاف محسوبة.

b_2 = عرض، مقدراً بـــ in (mm) ، المقطع الحرج في اتجاه المجاز العمودي على b_1.

عندما يزداد عرض المقطع الحرج المقاوم للعزم (عمود مستطيل)، فإن ذلك الجزء من عزم اللاتوازن، المنقول بالاتصال المرن، يزداد أيضاً.

يجب على قوة القص العظمى المحللة (إلى مركبات)، المعينة بتركيب الحمولة الشاقولية مع ذلك الجزء من قوة القص الناتجة عن عزم اللا توازن المنقول، ألا تتجاوز ϕV_c، بقيمة لـ V_c معطاة في معادلة V_c السابقة. ويمكن أن يتم تعيين القص الناتج عن نقل العزم عند المقطع الحرج بمعاملة هذا المقطع كأنبوب مشابه ذي ثخانة d وخاضع لعزم انعطاف $\gamma_v M_u$.

يكون إجهاد القص في الشق، عند وجه العمود أو عند الكتف الداعم محدداً بالقيمة $0.2\ f'_c$ أو بالقيمة العظمى لـ $800\ A_c$، حيث A_c مساحة مقطع البيتون المقاوم لنقل القص.

يجب أن يتم حساب مساحة تسليح القص الاحتكاكي A_{vf} المطلوبة، بالإضافة إلى التسليح المضاف الذي يعبأ بالشد المباشر الناتج عن تغيرات درجة الحرارة أو الانكماش، من العلاقة:

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\phi f_y \mu}$$

حيث:

V_u = القص التصميمي، Kip (KN)، في المقطع.

f_y = مقاومة خضوع التسليح ولا تزيد عن 60 Ksi (413.7 MPa).

f = عامل الاحتكاك ويساوي 1.4 من أجل البيتون المصبوب بنفس الوقت في جميع العناصر (البلاط والجيزان....) ويساوي 1.6 من أجل بيتون مصبوب فوق البيتون المتصلب ويساوي 0.7 من أجل بيتون مصبوب فوق عناصر فولاذية مدلفنة.

يجب أن يتم توزيع تسليح قص الاحتكاك بطريقة جيدة عبر وجه الشق وأن يُرسى بطريقة مناسبة على كل طرف.

التسليح الحلزوني Spirals

يجب ألاّ يقل قطر هذا النوع من التسليح المستعرض (الموضوع بشكل عرضاني) عن $\frac{3}{8}$ إنش (9.5 mm) . يمكن أن يتم إرساء التسليح الحلزوني عند طرفيه بـــ $1\frac{1}{2}$ دورة إضافية للحلزون. ويمن تركيب هذه الجديلة من القضبان عن طريق لحامها أو عن طريق لفهّا (غزلها) بقطر يساوي إلى 48 مرة من قطر القضبان المستخدمة ولا يقل عن 12 إنش (304.8 mm). يجب ألا يتجاوز التباعد بين دورانات الحلزون (الخطوة الدورانية) 3 إنش (76.2 m) أو أن يكون أقل من 1 إنش (25.4 mm). يجب أن يكون التباعد النظيف (من الداخل إلى الداخل) على الأقل $1\frac{1}{3}$ مرة من القيمة العظمى للتركيب الحبي للبيتون.

ويجب أن تكون نسبة حجم اسطوانة الفولاذ الحلزوني على اسطوانة النواة البيتونية المليئة (من خارج الحلزون) على الأقل:

$$\rho_s = 0.45\left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right)\frac{f_c'}{f_y}$$

حيث:

A_g = مساحة المقطع الخامي للعمود.

A_c = مساحة نواة العمود المقاسة من خارج الحلزون.

f_y = مقاومة خضوع فولاذ الحلزون.

f_c' = مقاومة ضغط البيتون في اليوم 28.

الهياكل المقواة والهياكل اللا مقواة

Braced And Unbraced Frames

حتى تتخذ دليلاً توجيهياً في الحكم إذا ما كان الإطار مقوى أم لا، عُد إلى شرح الـــ ACI، الذي يُبين أنه يمكن اعتبار الهيكل مقوّى إذا كان لعناصر التقوية،

مثل الجدارن القصّية أو الجيزان الشبكية أو الطرق الأخرى المقاومة للحركة الجانبية في الطابق، صلابة إجمالية تساوي على الأقل إلى ستة أضعاف مجموع صلابات كل الأعمدة المقاومة للحركة الجانبية في الطابق.

يمكن أن يتم حذف تأثير النحافة تحت الشرطين التاليين:

بالنسبة للأعمدة المقواة ضد الحركة بالاتجاه الجانبي، عندما:

$$\frac{kl_u}{r} < 34 - 12\frac{M_1}{M_2}$$

حيث:

M_1 = أصغر عزمي نهايتيْ العمود المُعيّن وفق طريقة التحليل التقليدية للإطار المرن، وبإشارة موجبة إذا كان العمود مثنياً بانحناء واحد وبإشارة سالبة إذا كان العمود مثنياً بانحنائين.

M_2 = القيمة المطلقة لأكبر عزمي نهايتي العمود المعيّن وفق طريقة التحليل التقليدية للإطار المرن.

وبالنسبة للأعمدة اللا مقواة ضد الحركة بالاتجاه الجانبي، عندما:

$$\frac{kl_u}{r} < 22$$

Load-Bearing Walls جدران التحميل الشاقولي

تخضع هذه الجدران، إضافة إلى وزنها الذاتي، إلى حمولات ضغط محورية وإلى انحناء مرن في حال وجود حمولة لا مركزية أو حمولات جانبية. يمكن أن تُصمّم جدران التحميل الشاقولي بطريقة مشابهة لتلك الطريقة الخاصة بالأعمدة التي تتضمن متطلبات تصميم مغايرة لآلية التحميل الجداري.

وكحل بديل آخر، يمكن أن تُصمّم جداران التحميل وفق إجراءات عملية معطاة في كود الـــ ACI عندما تكون لا مركزية حمولة الضغط الحاصلة مساوية أو أقل من سدس ثخانة الجدار.

وعلى جدارن التحميل المصممة بإحدى الطريقتين أن تقابل متطلبات التسليح الأصغرية العائدة لحالة الجدران اللا تحميلية.

في الطريقة الحقلية، وتكون السعة المحورية (الحملية) للجدار مقدرة بـــ Kip (KN):

$$\phi p_n = 0.55\phi f'_c A_g \left[1-\left(\frac{kl_c}{32h}\right)^2\right]$$

حيث:

f'_c = مقاومة ضغط البيتون في اليوم 28 .Ksi (MPa).

A_g = مساحة مقطع الجدار الخامية (الإجمالية)، in^2 (mm^2).

ϕ = عامل تخفيض المقاومة = 0.70.

l_c = المسافة الشاقوليبة بين المساند، in (mm)

h = الثخانة الإجمالية للجدار، in (mm)

k = عامل الطول الفعّال.

ويجب أن يؤخذ الطول الفعال – في جدار يعبأ بحمولة مركزة – للمسند الذي يعبأ بهذه الحمولة كأصغر مسافة من المركز إلى المركز بين الحمولات وعرض التحميل زائد 4h.

Shear Walls الجدران القصيّة

الجدران الخاضعة إلى قوى قص أفقية في مستوى الجدار بالإضافة إلى تحقيقها لمتطلبات المرونية، يجب أن تكون قادرة على مقاومة القص.

يمكن أن يُحسب إجهاد القص الاسمي من:

$$v_u = \frac{V_u}{\phi hd}$$

حيث:

V_u = قوة القص التصميمية الكلية.

ϕ = عامل تخفيض السعة = 0.85

$d = 0.8\, l_w$

h = الثخانة الكلية للجدار

l_w = الطول الأفقي للجدار.

تعتمد قوة القص التصميمية V_c التي يعبأ بها البيتون على إذا ما كانت حمولة التصميم المحورية N_u، الناظمية على المقطع العرضي الأفقي للجدار والتي تعمل بصورة آنية ومتزامنة مع V_u في المقطع، قوة ضغط أم قوة شد. فعندما تكون N_u قوة ضاغطة، يمكن أن تؤخذ V_c مساوية لـ $2\sqrt{f'_c}\,hd$، حيث، f'_c مقاومة ضغط البيتون في اليوم 28 مقدرة بـ lb/in^2 (MPa). وعندما تكون N_u قوة شادة فيجب أن تؤخذ كقيمة مساوية لأصغر القيمتين المحسوبتين من:

$$V_c = 3.3\sqrt{f'_c}\,hd - \frac{N_u d}{4 l_w}$$

$$V_c = hd\left[0.6\sqrt{f'_c} + \frac{l_w (1.25\sqrt{f'_c} - 0.2 N_u / l_w h)}{M_u / V_u - l_w / 2}\right]$$

ولا تطبق هذه المعادلة، في جميع الأحوال، عندما يكون $\left(\frac{M_u}{V_u} - \frac{l_w}{2}\right)$ سالباً.

عندما تكون قوة القص V_u المحللة إلى مركبات (أو المضروبة بعامل تصغير) أقل من $0.5\ \phi\ V_c$، فيجب أن يتم تزويد التسليح وفق ما هو مطلوب بالطريقة الحقلية الخاصة بالجدران التحميلية.

وعندما تتجاوز V_u المقدار $0.5\ \phi\ V_c$، فيجب أن يتم تزويد التسليح الأفقي وفق العلاقة : $V_s = A_v f_y d/s_2$، حيث: S_2 = تباعد التسليح الأفقي وA_v = مساحة التسليح.

أيضاً، يجب أن تكون النسبة ρ_h لتسليح القص الأفقي على مساحة البيتون الخامية مساوية على الأقل إلى 0.0025.

يجب ألا يتجاوز تباعد قضبان القص الأفقية $\frac{lw}{5}$ أو 3h أو 18 إنش (457.2 mm).

إضافة لذلك، يُفضّل ألا تزيد نسبة مساحة تسليح القص الشاقولي إلى مساحة البيتون الخامية للمقطع الأفقي للجدار عن تلك النسبة المطلوبة للتسليح الأفقي ولكن يجب ألا تقل عن:

$$\rho_n = 0.0025 + 0.5\left(2.5 - \frac{h_w}{l_w}\right)$$
$$(\rho_h - 0.0025) \le 0.0025$$

حيث:

h_w = الارتفاع الكلي للجدار.

يجب ألا يتجاوز تباعد تسليح القص الشاقولي $\frac{l_w}{3}$ أو 3h أو 18 إنش (457.2 mm).

وفي جميع الحالات، يجب عدم أخذ قوة القص V_n أكبر من $10\sqrt{f'_c}hd$ في أي مقطع.

يجب ألا يتجاوز إجهاد التحميل على البيتون، في أماكن إرساء العناصر المزودة بتسليح كاف في نهاية المنطقة، القيمة f_b المحسوبة من:

$$f_b = 0.8f'_c \sqrt{\frac{A_b}{A'_b} - 0.2} \le 1.25f'_{ci}$$

$$f_b = 0.6\sqrt{f'_c}\sqrt{\frac{A_b}{A'_b}} \le f'_c$$

حيث:

A_b = مساحة تحميل صفيحة الإرساء.

A'_b = المساحة الأعظمية لجزء من سطح الإرساء المشابه والمتمركز هندسياً مع مساحة صفيحة الإرساء.

إن تحليلاً أكثر عمقاً وحيطةً يمكن أن يُطبّق في تصميم مناطق إرساء النهايات للعناصر المسبقة الإجهاد من أجل زيادة المقاومة الحدية للأوتار المشدودة. ويجب أن تؤخذ ϕ مساوية لـــ 0.90 من أجل البيتون.

جدران البيتون الاستنادية الثقالية

Concrete Gravity Retaining Walls

تتضمن القوى الفاعلة على الجدران الثقالية وزن الجدار ووزن التربة على الظهر المائل وكعب (المرتكز الخلفي) الجدار وضغط التربة الجانبي وضغط التربة الحاصل على القاعدة. ومن المنصوح به تضمين قوة مؤثرة على قمة الجدار أيضاً لتوضيح فعل الصقيع، بقيمة تقريبية 700 lb/linear ft (1042 Kg/m).

بالمحصلة، قد يفشل أو ينهار الجدار بالانقلاب أو بالانزلاق أو نتيجةً لإجهادات مفرطة على البيتون أو نتيجةً لغوص ناتج عن انسحاق التربة.

يبدأ التصميم عادةً باختيار شكل وأبعاد تجريبية ثم يتم اختبار هذا التصميم على الاستقرار. وعندما يكون ارتفاع الجدار ثابتاً، فيمكن عندئذٍ أن يتم تحليل مقطع بطول 1 قدم (0.305 m) كطريقة ملائمة للتصميم. تؤخذ العزوم حول إصبع القدم

(الارتكاز الأمامي). ويجب أن يكون مجموع عزوم التصحيح (العزوم المضادة للانقلاب) مساوياً على الأقل إلى 1.5 مرة من مجموع عزوم الانقلاب. ولمنع الانزلاق:

$$\mu R_v \geq 1.5 p_h$$

حيث:

μ = عامل الاحتكاك الانزلاقي.

R_v = القوة الإجمالية المؤثرة على التربة بالاتجاه السفلي، lb (N).

p_h = المركبة الأفقية لدفع التربة، lb (N).

بعد ذلك، لابد من إيجاد موقع القوة الشاقولية الحاصلة عند عدة مقاطع للجدار عن طريق أخذ مجموع العزوم حول إصبع القدم (نقطة الارتكاز الأمامية) ثم تقسيم المجموع على R_v. ويجب على القوة الحاصلة أن تفعل في الثلث الأوسط من كل مقطع إن لم تكن هناك قوة شادة في الجدار.

أخيراً، لابد من حساب الضغط المبذول من قبل القاعدة على التربة للتأكد من أن الضغط المسموح على التربة لم يتم تجاوزه. وعندما يكون الضغط الحاصل واقعاً ضمن الثلث الأوسط، فإن الضغوط تحت نهايات القاعدة مقدرة بـــ lb/ft^2 (Pa) تُعطى بـــ:

$$p = \frac{R_v}{A} \pm \frac{M_c}{I} = \frac{R_v}{A}\left(1 \pm \frac{6e}{L}\right)$$

حيث:

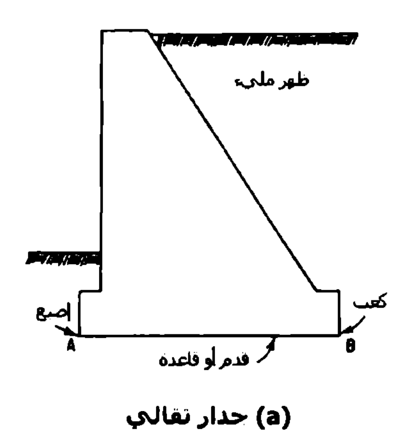
A = مساحة القاعدة، ft^2 (m^2).

L = عرض القاعدة، ft (m).

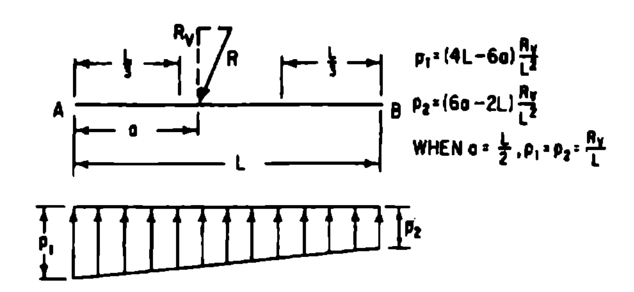
e = المسافة، الموازية لـــ L، من مركز ثقل القاعدة إلى R_v، ft (m).

يوضح الشكل 5.4 الضغط الموزع تحت شريحة بعرض 1 قدم (0.305 m) تحت الجدار من أجل $e = \frac{L}{2} - a$، حيث، a بعد R_v عن إصبع القدم. وعندما تبعد R_v

بمقدار $\frac{L}{3}$ تماماً عن إصبع القدم، فإن الضغط عند كعب القدم يصبح صفراً (الشكل 5.4c). وعندما تقع R_v خارج الثلث الأوسط، فإن الضغط يتلاشى أسفل المنطقة حول الكعب ويصبح الضغط عند الإصبع أكبر بالمقارنة مع الحالات الأخرى (شكل 5.4 d).



(a) جدار تقالي

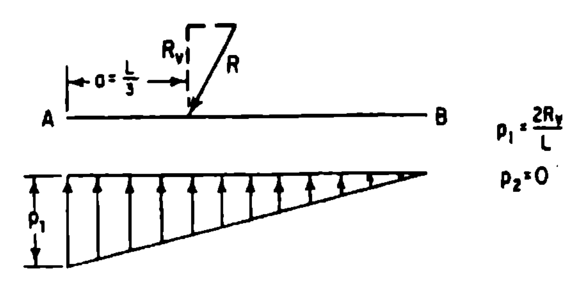


(b) محصلة القوى تقع ضمن الثلث الأوسط

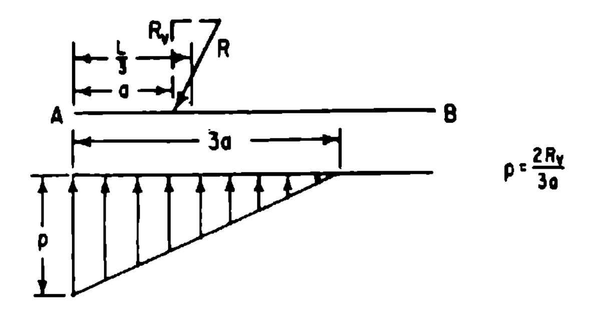
الشكل 5.4 مخططات الضغط على قاعدة جدار ثقالي بيتوني يستند على تربة

(a) مقطع شاقولي مار بالجدار.

(b) مقدار الضغط أسفل القاعدة بأكملها.



(c) محصلة القوى عند حافة الثلث الأوسط



(d) محصلة القوى خارج الثلث الأوسط

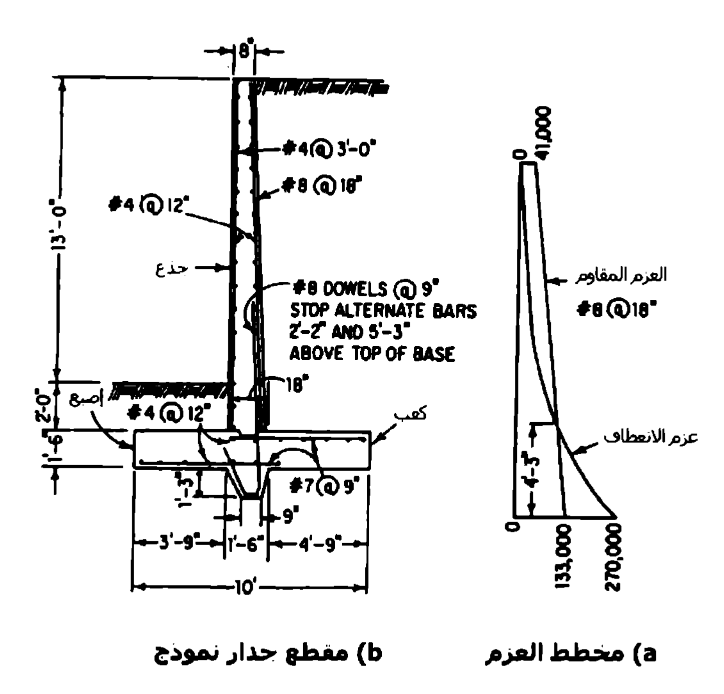
الشكل 5.4 /تابع/ مخططات الضغط على قاعدة جدار بيتوني يستند على التربة، من الأسفل.

(c) لا يوجد ضغط على إحدى حواف القاعدة.

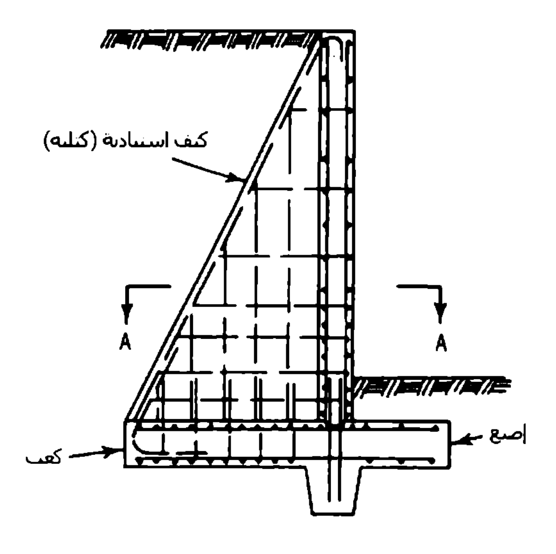
(d) ضغط تحت جزء من القاعدة فقط. لا يوجد مسند من التربة تحت بقية الجائز.

Cantilever Retaining Walls الجدران الاستنادية الظفرية

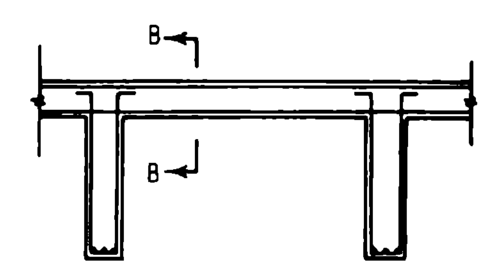
يقاوم هذا النوع من الجدران الدفع الجانبي لضغط التربة من خلال عمل ظفر الجذع الشاقولي ومن خلال القاعدة الأفقية (شكل 5.5). وتكون عادة الجدران الظفرية اقتصادية من أجل ارتفاعات تتراوح من 10 إلى 20 قدم (3 إلى 6 متر). بالنسبة للجدران القليلة الارتفاع، فقد تكون الجدران الثقالية أقل كلفة في هذه الحالة. أما بالنسبة للجدران المرتفعة، فقد تكون جدران الأكتاف الاستنادية هي الأقل كلفة في هذه الحالة (الشكل 5.6).



الشكل 5.5 جدار استنادي ظفري. (a) مقطع شاقولي يُبيّن فولاذ التسليح الرئيسي المتوضع شاقولياً في الجذع. (b) مخطط العزم



a) المقطع B-B



a) المقطع A-A

الشكل 5.6 جدار استنادي ذو كتف كتلية. (a) مقطع شاقولي. (b) مقطع أفقي

يمكن أن يتم حساب إجهاد واحدة القص المؤثرة على المقطع الأفقي لجدار استنادي من $v_c = V_1/bd$، حيث، b هي ثخانة كتف الجدار الاستنادي و d هي المسافة الأفقية من وجه الجدار إلى فولاذ التسليح الرئيسي،

$$V_1 = V - \frac{M}{d}(\tan\theta + \tan\phi)$$

حيث:

V = قوة القص المؤثرة على المقطع.

M = عزم الانعطاف في المقطع.

θ = زاوية الكتف المواجه للتربة مع الشاقول.

φ = زاوية وجه الجدار مع الشاقول.

ومن أجل وجه شاقولي للجدار تكون: $\phi = 0$ و $V_1 = V - (M/d)\tan\theta$.

يمكن أن يؤخذ مقطع القص الحرج، بطريقة تقليدية، على مسافة ترتفع عن القاعدة مساوية إلى $d'\sin\theta\cos\theta$، حيث: d' عمق الكتف على امتداد قمة القاعدة.

Wall Footings الاساسات (الأقدام) الجدارية

تُوزّع القدم المنتشرة (المنبسطة) تحت الجدار (الشكل 5.7) حمولة الجدار أفقياً لمنع الغوص المفرط.

تعمل القدم كظفر، على الجانبين المتقابلين للجدار، واقعة تحت تأثير حمولات الجدار نحو الأسفل وضغط التربة نحو الأعلى.

فمن أجل الأقدام الداعمة للجدران البيتونية، يكون المقطع الحرج واقعاً في النقطة الوسطى بين الحافتين الوسطيتين للجدار. إذن، بالنسبة لشريحة ذات طول 1 قدم (0.305 m) من قدم جدار بيتونية متناظرة ومحملة بشكل متناظر، يكون العزم الأعظمي مقدراً بـــ ft.lb (N.m):

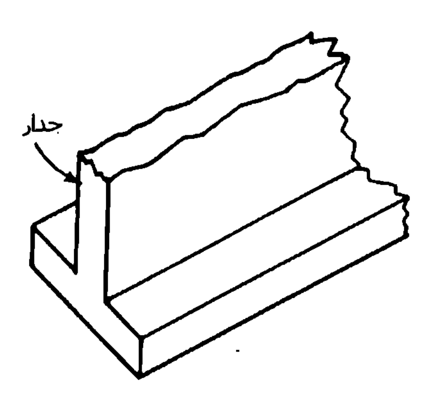
$$M = \frac{p}{8}(L-a)^2$$

حيث:

p = الضغط المنتظم على التربة، lb/ft^2 (Pa).

L = عرض القدم، ft (m).

a = ثخانة الجدار، ft (m).



الشكل 5.7 قدم جدار بيتونية

إذا كانت القدم عميقة إلى حد كاف بحيث أن إجهاد الانعطاف الشدي يساوي $6\,M/t^2$، حيث M العزم المضروب بأمثال عددية (مركبة عزم) و t عمق القدم مقدرة بـــ in (mm)، ولا يتجاوز المقدار $5\phi\sqrt{f'_c}$، حيث f'_c مقاومة ضغط البيتون في اليوم 28 مقدرة بـــ lb/in^2 (MPa) و0.90 = ϕ)، فلا حاجة لأن تكون القدم مسلحة. أما في حالة كان إجهاد الشد أكبر، فعندها لابد أن تصمم القدم كجائز مُسلح ذي مقطع مستطيل بعرض 12 إنش (305 mm).

يجب أن يتم وضع القضبان باتجاه عرض القدم بقطر 3 إنش (76.2 mm) بدءاً من قاعدة القدم. يُقاس تزايد طول القضيب من النقطة التي يحدث عندها المقطع الحرج بالنسبة للعزم. يمكن أن يتم تصميم الأقدام الجدارية أيضاً وفق نظرية المقاومة الحدية.

6

الصيغ الخاصة بهندسة المنشآت الخشبية

Timber Engineering Formulas

الترتيبات والمقاييس النظامية للقطع الخشبية

Grading Of Lumber

تتألف الألواح والقطع الخشبية (المنشورة)، الخاضعة لإجهادات نظامية، من الأصناف الثلاث التالية:

1. الجيزان والعوارض الطولانية. وهي عبارة عن قطع خشبية ذات مقطع عرضي مستطيل بثخانة 5 in (127 mm) أو أكثر وبعرض 8 in (203 mm) أو أكثر، نظامية بما يخص مقاومتها للانعطاف في حال تحميلها على وجهها الضيق.
2. العوارض الرقيقة والألواح الطولانية. وهي عبارة عن قطع خشبية مستطيلة المقطع العرضي بثخانة تبدأ من 2 in (50.8 mm)، ولا تتضمنها، إلى ثخانة 5 in (127 mm) وبعرض 4 in (102 mm) أو ما يزيد عنه، مُعدَّة نظامياً بما يخص مقاومتها للانعطاف عندما تُحمَّل، إمّا على الوجه الضيق كعارضة طولانية نحيلة، وإمّا على وجهها العريض كألواح طولانية حاملة.
3. الدعامات والقوائم الحاملة (المورينات). هي قطع خشبية ذات مقطع عرضي مربع أو قريب من المربع بعداهُ 5 × 5 in (127 × 127 mm) أو أكبر، مُعدَّة نظامياً، وبصورة مبدئية، لأن تُستخدم كدعامات أو كأعمدة تحمل حمولة طولانية (كالجيزان)، إلا أنها معدّلة لعدة استخدامات لا تكون فيها مقاومتها على الانعطاف أهمية تُذكَر.

تُطبَّق واحدة الإجهادات المسموحة على حالة التحميل التي تكون فيها القطع الخشبية نظامية فقط.

قياسات القطعة الخشبية Size Of Lumber

يتم اختيار القطعة الخشبية المسند إليها مهمة ما عن طريق قياساتها الاسمية عادةً.

فقياس القطعة الخشبية اللا مسواة (غير المسحوجة) هو نفس قياسها الاسمي، بينما أبعاد القطعة الخشبية المسواة أو المسحوجة تكون أصغر بـ $\frac{3}{8}$ إلى $\frac{1}{2}$ in (من 9.5 إلى 12.7 mm).

وقد وُضّحت خصائص قياسات بضعة قطع خشبية نظامية منتقاة، مع الصيغ المتعلقة بهذه الخصائص، في الجدول 6.1.

التحميل Bearing

واحدات الإجهادات المسموحة بما يخص الضغط العمودي على الليف الخشي تُطبّق على تحميل من أي امتداد كان عند أطراف الجيزان وتُطبّق على تحميل بامتداد 6 in (152.4 mm) أو ما يزيد في الأماكن المتبقية من الجيزان. وعند حساب مساحة التحميل المطلوبة في أطراف الجيزان يجب ألا يتم حساب هذه المساحة بالاستناد على حقيقة أن الجائز ينحني (ينعطف) بل بالاستناد على حقيقة أن الضغط المؤثر فوق الحافة أو الحد الداخلي للتحميل أكبر من ذلك الضغط المؤثر عند أطراف الجائز. وبالنسبة لتحميل يمتد بطول أقل من 6 in (152.4 mm) ويبتعد بـ 3 in (76.2 mm) على الأقل (أدنى اقتراب) من طرف أو من نهاية العنصر، عندئذ يتوجب على الإجهاد المسموح الخاص بالضغط العمودي على الليف الخشبي أنّ يُعدّل بجدائه بالعامل $\left(l+\frac{3}{8}\right)/l$، حيث، l: هو طول التحميل بالإنشات (بالميليمترات) مقاساً على امتداد الليف الطولاني للخشب.

الجيزان Beams

إن الإجهاد في الليف الأبعد الناتج عن الانعطاف في جائز خشبي ذي مقطع مستطيل هو:

$$f = 6\ M/bh^2$$

$$= M/S$$

الجدول 6.1 مواصفات قياسات المقاطع العرضية للقطع الخشبية النظامية. *(تم إعطاء القياسات المسواة (S4S) وعزم العطالة وعامل المقطع بالنسبة للمحور xx وبأبعاد b و h وفق ما هو مبين بالمقطع العرضي)*

القياس الاسمي (b h)	القياس النظامي المسوّى S4S (b h)	مساحة المقطع $A = bh^2$	عزم العطالة $I = \frac{bh^2}{12}$	معامل المقطع $S = \frac{bh^2}{6}$	عدد واحدات الحجم القدمي* بالقدم الطولي من القطعة الخشبية
2×4	$1\frac{5}{8} \times 3\frac{5}{8}$	5.89	6.45	3.56	2/3
2×6	$1\frac{5}{8} \times 5\frac{1}{2}$	8.93	22.53	8.19	1
2×8	$1\frac{5}{8} \times 7\frac{1}{2}$	12.19	57.13	15.23	$1\frac{1}{3}$

المصدر: National Lumber Manufactures Association.

* واحدة الحجم القدمي: واحدة قياس أميريكية لحجم لوح من الخشب أبعاده 12 × 12 × 1 inches. (Board foot). (المعدّ)

ويفترض أن للجائز ذي المقطع الدائري نفس مقاومة انعطاف الجائز المربع الذي له نفس مساحة المقطع العرضي الدائري.

إجهاد القص الأفقي في جائز خشبي مستطيل هو:

$$H = 3\ V/2bh \qquad (6.1)$$

الجائز الخشبي المستطيل الذي فيه ثلم في الوجه السفلي عند طرفه، يكون إجهاد القص الأفقي فيه:

$$H = (3V/2bd_1)\ (h/d_1) \qquad (6.2)$$

ويقوم التغير التدريجي في المقطع، عوضاً عن الثلم المربع، بإنقاص إجهاد القص، تقريباً، إلى ذلك الإجهاد المحسوب بالنسبة للعمق الفعلي فوق الثلم.

يتم توضيح الرموز الحرفية في المعادلات السابقة كالتالي:

f = إجهاد الليف الأقصى، lb/in^2 (MPa).

M = عزم الانعطاف، lb.in (Nm).

h = عمق الجائز، in (mm).

b = عرض الجائز، in (mm).

S = عامل المقطع (= $\frac{bh^2}{6}$ بالنسبة للمقطع المستطيل)، in^3 (mm^3).

H = إجهاد القص الأفقي، lb/in^2 (MPa).

V = القص الإجمالي، lb (N).

d_1 = عمق الجائز فوق الثلم، in (mm).

يجب أن يؤخذ المجاز، في الجيزان البسيطة، مساوياً للمسافة من الوجه إلى الوجه للمسندين زائد نصفا طول التحميل المطلوب عند كل مسند من المسندين.

ويجب أن يؤخذ طول المجاز، في الجيزان المستمرة، مساوياً للمسافة بين مركزي التحميل فوق المسندين.

عندما تقوم بتعيين V، قم بحذف جميع الحمولات الواقعة على مسافة، من أحد المسندين، تساوي إلى عمق الجائز.

في حالة التدرج الإجهادي على جيزان ذات مقطع مليء، يكون قد تم تحديد التسامحات الخاصة باختبارات المقاطع وانفصال الأطراف والتشققات في حالة الإجهادات الواحدية المخصصة لذلك. فعلى مثل هذه العناصر لا تُعين المعادلة (6.1) مقاومة القص الفعلية بسبب إعادة توزيع إجهاد القص الذي يحدث في الجيزان المختبرة. حيث يتوجب، في الجائز ذي المقطع المليء الذي لا يتحدد باستخدام المعادلة (6.1) وكذا قيم H المعطاة من خلال البيانات المنشورة بالنسبة لحالة الإجهادات الواحدية المسموحة، أن يتم تعديل رد الفعل 'V المعين وفق ما هو موضح آنفاً:

من أجل الحمولات المركزة:

$$V^1 = \frac{10P(1-x)(x/h)^2}{9l[2+(x/h)^2]} \qquad (6.3)$$

من أجل التحميل المنتظم،

$$V^1 = \frac{w}{2}\left(1-\frac{2h}{l}\right) \qquad (6.4)$$

l = مجاز الجائز، in (mm).

P = الحمولة المركزة، lb (N).

V^1 = القص الإجمالي المعدّل للمسند، lb (N).

w = الحمولة الإجمالية الموزعة بانتظام، lb (N).

x = المسافة بدءاً من رد الفعل إلى الحمولة المركزة، in (mm).

يجب أن تُستبدل قيم 'V من المعادلتين (6.3) و(6.4) بـــ V في المعادلة (6.1) ويجب أن تُختبر قيم H الناتجة المقابلة لتلك المعطاة في جداول إجهادات الواحدة المسموحة الخاصة بحالة التحميل الموازية لليف الخشبي. كما يتوجب أن يتم تعديل مثل هذه القيم بالنسبة لفترة التحميل.

الأعمدة Columns

إجهاد الواحدة المسموح على الأعمدة الخشبية المؤلفة من قطعة خشبية واحدة أو مجموعة من القطع الملتصقة ببعضها لتشكل عنصراً واحداً هو:

$$\frac{P}{A}=\frac{3.619E}{(l/r)^2} \qquad (6.5)$$

وتصبح هذه الصيغة من أجل الأعمدة ذات المقطع المربع أو المستطيل:

$$\frac{P}{A}=\frac{0.30E}{(l/d)^2} \qquad (6.6)$$

وتصبح الصيغة من أجل الأعمدة ذات المقطع الدائري:

$$\frac{P}{A}=\frac{0.22E}{(l/d)^2} \qquad (6.7)$$

قد لا يتجاوز إجهاد الواحدة المسموح P/A إجهاد الضغط المسموح c.

يجب ألا تتجاوز النسبة l/d القيمة 50. وتخضع قيم P/A إلى فترة حمولة التعديل المعطاة سابقاً.

الرموز الحرفية في المعادلات من (6.5) إلى (6.7) هي:

P = الحمولة الإجمالية المسموحة، lb (N).

A = مساحة مقطع العمود العرضية، in^2 (mm^2).

c = إجهاد الواحدة المسموح في حالة الضغط الموازي لليف الخشبي، lb/in^2 (MPa).

d = بعد الضلع الأصغر للعمود، in (mm).

l = الطول غير المسنود للعمود بين نقاط الاستناد الطرفية، in (mm).

E = عامل المرونة، lb/in^2 (MPa).

r = نصف قطر الدوران الأصغري للعمود، in (mm).

وفي حالة العناصر المحملة مثل الأعمدة، تُعطى إجهادات الواحدة المسموحة المتعلقة بالتحميل على الليف الطرفي (الموازي لليف) ضمن البيانات المنشورة من قبل جمعيات الأخشاب. تطبق هذه الإجهادات المسموحة بشرط وجود استناد جانبي كافٍ ومقاطع طرفية مربعة تماماً ومتوازية فيما بينها. وعندما تتجاوز الإجهادات 75 % من القيمة المعطاة يجب أن يكون التحميل على صفيحة معدنية محتضنة بإحكام. تُطبق هذه الإجهادات تحت شروط دائمة الجفاف، ويجب أن تختزل بـــ 27 % بالنسبة للصفائح الخشبية الملصوقة ببعضها وكذا بالنسبة للأخشاب ذات الثخانة 4 إنش (102 mm) أو الأقل، ويجب أن تختزل بـــ 9 % بالنسبة للأخشاب المقطوعة بثخانة تزيد عن 4 إنش (102 mm) وكذا بالنسبة للأخشاب المعرضة للمناخ الخارجي.

الانعطاف المركب والحمولة المحورية

Combined Bending And Axial Load

العناصر الخاضعة لانعطاف مركب وحمولة محورية يجب أن تكون متناسبة بحيث تتحقق المتراجحة:

$$P_d/P + M_a/M < 1 \quad (6.8)$$

حيث:

P_u = الحمولة المحورية الإجمالية على العنصر، lb (N).

P = الحمولة الإجمالية المسموحة المحورية، lb (N).

M_u = عزم الانعطاف الإجمالي على العنصر، lb in (Nm).

M = عزم الانعطاف الإجمالي المسموح، lb in (Nm).

الضغط الذي يصنع زاوية مع الليف الخشبي

Compression At Angle To Grain

يساوي إجهاد الضغط الواحدي المسموح، عندما تصنع الحمولة زاوية مع الليف، إلى:

$$c' = c\,(c\perp)/[c\,(\mathrm{Sin}\theta)^2 + (c\perp)\,(\mathrm{Cos}\theta)^2] \quad (6.9)$$

حيث:

c' = إجهاد الواحدة المسموح الذي يصنع زاوية مع الليف الخشبي، lb/in^2 (MPa).

c = إجهاد الواحدة المسموح الموازي لليف الخشبي، lb/in^2 (MPa).

$c\perp$ = إجهاد الواحدة المسموح العمودي على الليف الخشبي، lb/in^2 (MPa).

θ = الزاوية بين اتجاه الحمولة واتجاه الليف الخشبي.

توصيات مخابر المنتجات الحراجية

Recommendations Of The Forest Products Laboratory

يعطي الكتاب العملي المساعد في هندسة المنشآت الخشبية الإرشادات والنصائح في كيفية تصميم الأعمدة الخشبية الكتيمة (المليئة)؛

(Wood Handbook, USDA Forest Products Laboratory, Madison, Wisc, 1999.)

تنقسم الأعمدة إلى ثلاثة أصناف، قصيرة ومتوسطة وطويلة.

لتكن K ترمز إلى البارامتر (وسيط) المعرّف بالمعادلة:

$$K = 0.64\left(\frac{E}{f_c}\right)^{1/2} \quad (6.10)$$

إن مجال أمثال النحافة والإجهاد المسموح المخصص لكل صنف تُعطى وفق ما يلي:

في العمود القصير:

$$\frac{L}{d} \le 11 \qquad f = f_c \qquad (6.11)$$

في العمود المتوسط الطول:

$$11 \le \frac{L}{d} \le k \qquad f = f_c\left[1 - \frac{1}{3}\left(\frac{L/d}{K}\right)^4\right] \qquad (6.12)$$

في العمود الطويل:

$$\frac{L}{d} > K \qquad f = \frac{0.274E}{(L/d)^2} \qquad (6.13)$$

وتثبت القيمة العظمى للنسبة L/d عند 50.

تغطي مواصفات التصميم الدولية تصميم الأعمدة المليئة. ويكون الإجهاد المسموح في المقطع المستطيل كما يلي:

$$f \le f_c \quad \text{مع} \quad f = \frac{0.30E}{(L/d)^2} \quad (6.14)$$

الرموز الحرفية في المعادلات السابقة تعطى وفق النظام الدولي كما يلي:

P = الحمولة المسموحة.

A = مساحة المقطع.

L = الطول اللا مقوّى.

d = البعد الأصغر في المقطع المستطيل.

E = عامل المرونة.

f_c = إجهاد الضغط المسموح الموازي لليف في عمود قصير من نوع مفروض.

f = إجهاد الضغط المسموح الموازي لليف في العمود المفروض.

الضغط على مستوٍ مائل Compression On Oblique Plane

لنعتبر أن عنصراً خشبياً يعبأ بقوة ضاغطة وفق اتجاه فعل يصنع زاوية مائلة مع الليف الخشبي. ولتكن:

P = إجهاد الضغط المسموح الموازي لليف.

Q = إجهاد الضغط المسموح الناظمي على الليف.

N = إجهاد الضغط المسموح المائل على الليف.

θ = الزاوية بين اتجاه الإجهاد N واتجاه الليف.

عن طريق معادلة هانكينسون (Hankinson's equation) نجد:

$$N = \frac{PQ}{P\sin^2\theta + Q\cos^2\theta} \qquad (6.15)$$

في الشكل 6.1، يجب أن يُثلم العنصر M_1 عند الوصلة لتجنّب إزالة مساحة زائدة عن الضرورة من العنصر M_2. فإذا ما تم قطع العنصر بهذه الطريقة التي يصنع فيها الضلعان AC وBC زاوية $\phi/2$ مع المستويين الشاقولي والأفقي على التوالي، فسوف تتطابق ضغوطات التحميل المسموحة عند هذه الأوجه بالنسبة للعنصرين. لتكن:

A = المساحة المقطعية للعنصر (مساحة المقطع العرضي) M_1.

f_1 = الضغط عند الطرف AC.

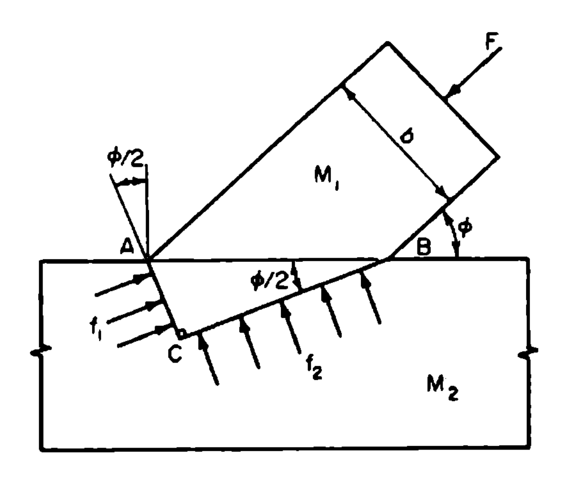
f_2 = الضغط عند الطرف BC.

يمكن أن يُبيَّن بسهولة أن:

$$AC = b\frac{\mathrm{Sin}(\phi/2)}{\mathrm{Sin}\phi} \quad ; \quad BC = b\frac{\mathrm{Cos}(\phi/2)}{\mathrm{Sin}\phi} \qquad (6.16)$$

$$f_1 = \frac{F\mathrm{Sin}\phi}{A\tan(\phi/2)} \quad ; \quad f_2 = \frac{F\mathrm{Sin}\phi\tan(\phi/2)}{A} \qquad (6.17)$$

هذا النوع من الوصلات غالباً ما يستخدم في الجيزان الشبكية الخشبية.



الشكل 6.1 وصلة خشبية.

عوامل التعديل الخاصة بقيم التصميم

Adjustment Factors For Design Values

قيم التصميم التي تم الحصول عليها من الطرق المُحدّدة سابقاً يجب أن تضرب بعوامل تعديل تستند على شروط الاستخدام والشروط الهندسية وشروط الاستقرار.

إن عوامل التعديل عوامل تراكمية ما لم يتم تعيينها بطريقة مميزة وخاصة وفق ما يلي:

تُعطى قيمة التصميم المعدّلة F'_b، بالنسبة لانعطاف الليف الأبعد، بالعلاقة:

$$F_b = F_b C_D C_M C_t C_L C_F C_V C_{fu} C_r C_c C_f \qquad (6.18)$$

حيث:

F_b = القيمة التصميمية لانعطاف الليف الأبعد.

C_D = عامل فترة التحميل.

C_M = عامل الخدمة الرطب.

C_t = عامل درجة الحرارة.

C_L = عامل استقرارية الجائز.

C_F = عامل القياس القابل للتطبيق فقط على العناصر المرونية من الأخشاب المستديرة والقطع الخشبية المقطوعة المتدرجة (المنتظمة) ظاهرياً.

C_v = عامل الحجم – قابل للتطبيق فقط على جيزان مؤلفة من صفائح ملصوقة ببعضها.

C_{fu} = عامل استخدام السطح – قابل للتطبيق فقط على جيزان خشبية ذات أبعاد من 2 إلى 4 إنش (50.8 إلى 101.6 ميليمتر) في الثخانة وعلى جيزان ذات صفائح ملصوقة ببعضها.

C_r = عامل العنصر التكراري – قابل للتطبيق فقط على جيزان خشبية ذات أبعاد من 2 إلى 4 إنش (50.8 إلى 101.6 ميليمتر) في الثخانة.

C_c = عامل الانحناء – قابل للتطبيق فقط على الأجزاء المنحنية من الجيزان ذات الصفائح الملصوقة ببعضها.

C_f = عامل الشكل.

وبما يخص الجيزان ذات الصفائح الملتصقة ببعضها، استخدم إمّا C_L أو C_V (أيهما أصغر) وليس كليهما.

تُعطى قيمة التصميم المعّدلة في حالة الشد F_t' بالعلاقة؛

$$F_t' = F_t\, C_D\, C_M\, C_t\, C_F \qquad (6.19)$$

حيث:

F_t هي قيمة التصميم الخاصة بالشد.

وتُحسب قيمة التصميم المعدّلة في حالة القص F_v من:

$$F_v' = F_v\, C_D\, C_M\, C_t\, C_H \qquad (6.20)$$

حيث F_v هي قيمة التصميم الخاصة بالقص وC_H عامل إجهاد القص ≤ 1، مقبول أو مسموح فقط بالنسبة لـــ F_v الموازية لليف عناصر القطع الخشبية المنشورة.

يتم الحصول على قيمة التصميم المعدّلة $F_t' \perp$ الخاصة بالضغط المتعامد مع الليف الخشبي من:

$$F_c' \perp = F_c \perp\, C_M\, C_t\, C_b \qquad (6.21)$$

حيث: $F_c \perp$ قيمة التصميم الخاصة بالضغط المتعامد مع الليف الخشبي وC_b عامل مساحة التحميل.

أمّا بما يخص قيمة التصميم المعدّلة F_c' العائدة لحالة الضغط الموازي لليف الخشبي فتعطى بـــ:

$$F_c' = F_c\, C_D\, C_M\, C_t\, C_F\, C_P \qquad (6.22)$$

حيث:

F_c قيمة التصميم للضغط الموازي لليف الخشبي وC_P عامل استقرار العمود.

وتُحسب قيمة التصميم المعدّلة F_g' العائدة لليف الطرفي في حالة التحميل الموازي لليف الخشبي من:

$$F_g' = F_g\, C_D\, C_t \qquad (6.23)$$

حيث: F_g قيمة التصميم لليف الطرفي في حالة التحميل الموازي لليف الخشبي.

ويتم الحصول على قيمة التصميم المعدّلة الخاصة بعامل المرونة E' من:

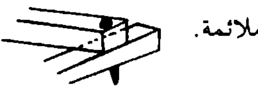
$$E' = E\, C_M\, C_T\, C \ldots \qquad (6.24)$$

حيث:

E = قيمة التصميم الخاصة بعامل المرونة.

C_T = عامل صلابة التحنيب - قابل للتطبيق فقط على قضبان أو أوتار ضغط لجائز شبكي مؤلف من قطع خشبية منشورة، قياس هذه الأوتار أو القضبان 4 × 2 إنش (50.8 × 101.6 mm) أو أصغر عندما تكون خاضعة إلى انعطاف مركب وضغط محوري، وكذا قابل للتطبيق فقط على غمد خشبي مؤلف من طبقات سماكته $\frac{3}{8}$ إنش (9.5 mm) أو أكثر ومُسمَّر على الوجه الضيق.

$C \ldots$ = عوامل تعديل أخرى ملائمة.



عوامل القياس والحجم

يجب أن تضرب القيم التصميمية F_b و F_t و F_c من أجل جميع الأصناف والأصناف المركبة ماعدا خشب الصنوبر الجنوبي وذلك بما يخص القطع الخشبية ذات الأبعاد المنتظمة ظاهرياً بعامل القياس المناسب C_F المعطى في البيانات المرجعية لتبيين وتوضيح تأثيرات قياس العنصر. يعتمد هذا العامل والعوامل المستخدمة، لتحسين قيم القياس المميزة لخشب الصنوبر الجنوبي، على معادلة التعديل المعطاة في الجمعية الأميريكية للمواد والتجارب (ASTM) D1990. توضح هذه المعادلة المعتمدة على بيانات تجريبية غير منتظمة الفروقات في F_b و F_t و F_c المتعلقة بالعرض وكذا الفروقات في F_b و F_t المتعلقة بالطول (تجربة المجاز).

بما يخص مقاييس القطع الخشبية النظامية ظاهرياً [5 × 5 إنش (127 × 127 mm) أو أكبر] وعندما يتجاوز العمق d لجائز طولاني أو دعامة أو قطعة خشبية 12 إنش (304.8 mm) لابد من أن يتم تعديل قيمة تصميم الانعطاف بعامل القياس:

$$C_F = (12/d)^{1/9} \qquad (6.25)$$

ويجب أن يتم تعديل قيم تصميم الانعطاف F_b، بما يخص جيزان الرقائق الملصوقة ببعضها من أجل تأثير الحجم، بضربها بـــ:

$$C_V = K_L\left[\left(\frac{21}{L}\right)\left(\frac{12}{d}\right)\left(\frac{5.125}{b}\right)\right]^{1/x} \qquad (6.25)$$

حيث:

L = طول الجائز بين نقاط الانعطاف ft (m).

d = عمق الجائز، in (mm).

b = عرض الجائز، in (mm) = عرض القطعة الأعرض في توضّع متعدد القطع مؤلف من عدة عروض، وعليه b ≥ 10.75 إنش (273 mm).

x = 20 بالنسبة لخشب الصنوبر الجنوبي.

= 10 بالنسبة لأصناف الخشب الأخرى.

K_L = أمثال شروط التحميل.

ويجب أن تُستخدم، بما يخص الجيزان المؤلفة من قطع ملصوقة ببعضها، القيمة الأصغر لـــ C_V أو العامل استقرار الجائز C_L، عامل استقرار الجائز، وليس كلتيهما.

الإجهادات القطرية وعامل الانحناء

الإجهاد القطري المُحرَّض أو المُفعّل من قبل عزم الانعطاف في عنصر ذي مقطع عرضي ثابت يمكن أن يُحسب من:

$$f_r = \frac{3M}{2Rbd} \qquad (6.26)$$

حيث:

M = عزم الانعطاف، in.lb (N.m)

R = نصف قطر الانحناء في خط مركز العنصر، in (mm).

b = عرض المقطع العرضي، in (mm).

d = عمق المقطع العرضي، in (mm).

عندما تكون M وفق الاتجاه الذي ينـــزع إلى إنقاص الانحناء (زيادة نصف القطر)، فإن إجهادات الشد تحدث وفق الاتجاه المستعرض للألياف الخشبية. لهذا السبب أو الشرط يكون إجهاد الشد المسموح المستعرض لليف الخشبي محدوداً بثلث واحدة الإجهاد المسموح في القص الأفقي لأخشاب الصنوبر الجنوبي من أجل جميع شروط التحميل وكذا لأخشاب الشوح دوغلاس (Douglas fir) والأخشاب الراتينجية القاسية من أجل أنواع التحميل الناتجة عن الرياح والزلازل.

ويكون الحد هو $15\ lb/in^2$ (0.103 MPa) بالنسبة لخشب شوح دوغلاس وخشب الصنوبر القاسي وذلك من أجل أنواع التحميل الأخرى. وتخضع هذه القيم إلى عملية تعديل بما يخص فترة التحميل. وإذا ما تجاوزت هذه القيم حدودها، عندئذ لابد من تسليح ميكانيكي كافٍ لمقاومة جميع إجهادات الشد القطرية.

وعندما تكون M وفق الاتجاه الذي ينـــزع إلى زيادة الانحناء (نقصان نصف القطر) فإن الإجهاد يكون ضاغطاً عبر الاتجاه المستعرض للألياف الخشبية. وبسبب هذا الشرط، تكون القيمة التصميمية محدودة بقيمة الضغط العمودي على الألياف من أجل جميع الأصناف.

وبما يخص الجزء المنحني للعناصر، فيجب أن تكون القيمة التصميمية للخشب الخاضع للانعطاف معدّلة عن طريق جدائها بعامل الانحناء التالي:

$$C_c = 1 - 2000\left(\frac{t}{R}\right)^2 \qquad (6.27)$$

حيث t هي ثخانة الرقيقة (الشريحة) الخشبية مقدرة بـــ in (mm)، و R نصف قطر انحناء الرقيقة مقدراً بـــ in (mm). لاحظ أن t/R يجب ألا تتجاوز 1/100 من أجل الأخشاب القاسية وأخشاب الصنوبر الجنوبي أو يجب ألا تتجاوز 1/125 من أجل الأخشاب الطرية وأخشاب الصنوبر الجنوبية الأخرى. يجب ألا يتم تطبيق عامل الانحناء على الإجهاد في الجزء المستقيم من التركيب أو التجميع الخشبي بغض النظر عن الانحناء في الأماكن الأخرى.

عامل مساحة التحميل

تطبق القيم التصميمية للضغط العمودي على الليف الخشبي $F_{c}\perp$ على سطوح التحميل من أي طول عند أطراف العنصر وعلى جميع الأحمال الممتدة بطول 6 إنش (152.4 mm) أو أطول عند المواقع الأخرى. وبما يخص الأحمال الممتدة بطول أقل من 6 إنش (152.4 mm) وبحد أدنى بطول 3 إنش (76.2 mm) من طرف العنصر، يمكن أن تُضرب $F_{c}\perp$ بعامل مساحة التحميل:

$$C_b = \frac{L_b + 0.375}{L_b} \quad (6.28)$$

حيث L_b طول التحميل مقدراً بـــ in (mm) ومقاساً بالاتجاه الموازي للألياف الخشبية.

تعطي المعادلة (6.28) قيم C_b للعناصر ذات المساحات الصغيرة، مثل الصفائح والأطر الخشبية الرقيقة، حيث تم سردها في البيانات المرجعية. وبالنسبة لمساحات التحميل الدائرية، مثل الأُطر الخشبية الرقيقة، يجب أن تؤخذ L_b كقطر.

عاملا استقرارية الأعمدة والصلابة التحنيبية

قيم تصميم الضغط الموازي لليف F_t يجب أن تضرب بعامل استقرارية العمود C_p المُعطى وفق المعادلة (6.29):

$$C_p = \frac{1 + (FcE / F_c^*)}{2c} - \sqrt{\left[\frac{1 + (FcE / F_c^*)}{2c}\right]^2 - \frac{(FcE / F_c^*)}{c}} \quad (6.29)$$

حيث:

F_c^* = القيمة التصميمية للضغط الموازي لليف مضروبة بكل عوامل التعديل القابلة للتطبيق ماعدا C_p.

$$\frac{KcE'}{(L_e / d)^2} = FcE$$

E' = عامل المرونة مضروباً بعوامل التعديل.

KcE = 0.3 من أجل قطع خشبية نظامية ظاهرياً وقطع خشبية مُقيمة آلياً.

= 0.418 لمنتجات بأمثال تغيّر أقل من 0.11

c = 0.80 لقطع خشبية مليئة صلبة، و

= 0.85 لركائز خشبية دائرية، و

= 0.90 لأخشاب من عدة قطع ملصوقة ببعضها.

وتساوي C_P لـــ 1.0 من أجل عنصر ضغط مُقوى في جميع الاتجاهات على امتداد طوله لمنع الإزاحات الجانبية.

إن صلابة التحنيب، لوتر ضغط في جائز خشبي مؤلف من قطع خشبية خاضعة لمرونة مركبة وضغط محوري تحت شروط خدمة جافة، يمكن أن تتزايد إذا كان الوتر ذا بعد 4 × 2 إنش (50.8 × 101.6 mm) أو أصغر وكان وجهه الضيق مقوّى بغمد خشبي مُسمّر بثخانة 3/8 إنش (9.5 mm) على الأقل وفق عملية التسمير التطبيقية الجيدة. يمكن أن توضّح الصلابة المتزايدة عن طريق جداء القيمة التصميمية لعامل المرونة E بعامل صلابة التحنيب C_T في عمليات حساب استقرارية العمود.

عندما يساوي طول العمود الفعّال L_e إلى 96 إنش (2.38 m) أو أقل، فيمكن أن تحسب C_T من:

$$C_T = 1 + \frac{K_M L_e}{K_T E} \qquad (6.30)$$

حيث:

K_M = 2300 من أجل خشب مُقسّى وبمحتوى رطوبة 19 % أو أقل وذلك في وقت تثبيت الغمد.

= 1200 من أجل خشب غير مُقسّى أو مقسى جزئياً عند وقت تثبيت الغمد.

K_T = 0.59 من أجل قطع خشبية منتظمة ظاهرياً وكذا من أجل قطع خشبية مقيمة آلياً.

= 0.82 من أجل منتجات خشبية بأمثال تغيّر تساوي 0.11 أو أقل.

حيث L_e أكبر من 96 إنش (2.38 m)، C_T يجب أن تحسب من المعادلة (6.30) مع L_e = 96 إنش (2.38 m).

بما يخص المعلومات الإضافية عن الجيزان الشبكية الخشبية المزودة بوصلات صفائح معدنية يمكن العودة إلى مقاييس التصميم النظامية العائدة إلى Truss Plate Institute, Madison, Wisconsin.

يُعرّف أمثال النحافة للجيزان بـــ:

$$R_B = \sqrt{\frac{L_e d}{b^2}} \qquad (6.31)$$

ويجب ألا يتجاوز أمثال النحافة القيمة 50.

يُعطى الطول الفعّال L_e في المعادلة (6.31) عن طريق الطول اللا مسنود للجائز في البيانات المرجعية. والطول اللا مسنود هو المسافة بين المساند أو طول الظفر عندما يكون الجائز مقوى جانبياً عند المساند لمنع الدوران وليس هناك أي تقوية كافية في مكان آخر في المجاز. وعندما يُمنع كلٌ من الدوران والإزاحة الجانبية عند النقاط المتوسطة أيضاً، فيمكن أن يؤخذ الطول اللا مسنود كمسافة بين نقاط المساند الجانبية. إذا كانت الحافة المضغوطة مسنودة على امتداد طول الجائز وتمّ تثبيت تقوية كافية عند المساند، فإن الطول اللا مسنود يساوي الصفر.

يمكن أن يُحسب عامل استقرارية الجائز C_L من:

$$C_L = \frac{1+(F_{bE}/F_b^*)}{1.9} - \sqrt{\left[\frac{1+(F_{bE}/F_b^*)}{1.9}\right]^2 - \frac{F_{bE}/F_b^*}{0.95}} \qquad (6.32)$$

حيث:

F_b^* = القيمة التصميمية للانعطاف مضروبة بجميع عوامل التعديل القابلة للتطبيق، باستثناء C_{fu} و C_v و C_L.

$$F_{bE} = \frac{K_{bE} E'}{R_B^2}$$

K_{bE} = 0.438 من أجل قطع خشبية نظامية ظاهرياً وكذا لقطع مقيمة آلياً.

= 0.609 لمنتجات خشبية بأمثال تغيّر 0.11 أو أقل.

E' = عامل تصميم المرونة مضروباً بعوامل التعديل القابلة للتطبيق.

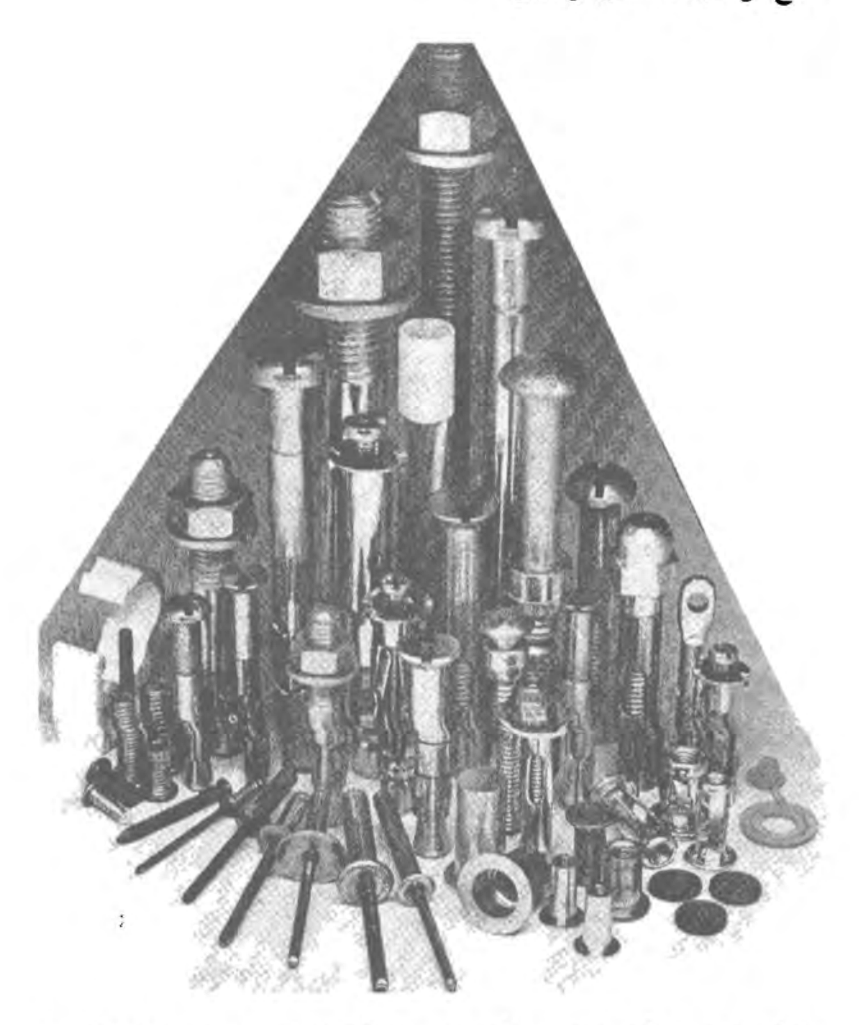
مثبتات (براغي ومسامير) الخشب Fastener For Wood

المسامير والمسامير الطويلة (الشوكات المعدنية)

حمولة السحب (حمولة قلع المسمار من مكانه) المسموحة بالإنش الواحد (25.4 mm) لاختراق مسمار عادي أو شوكة معدنية غائصة وفق الاتجاه الطرفي لليف (بشكل عمودي على الليف) لخشب مُقسّى أو للخشب اللا مقسى الذي يبقى رطباً، تساوي:

$$p = 1{,}380\, G^{5/2} D \quad (6.33)$$

نماذج من المثبتات الخشبية والمعدنية



مفيد أن نذكر هنا أنه في اللغة الانكليزية يوجد لكل نموذج من هذه المثبتات تسمية خاصة به. (المعدّ)

حيث

p = الحمولة المسموحة بالإنش (mm) للاختراق ضمن عنصر يتلقى نقطة تحميل، lb (N).

D = قطر المسمار أو الشوكة، in (mm).

G = الوزن النوعي للخشب، المجفف بالفرن.

وتكون الحمولة الإجمالية الجانبية المسموحة لمسمار أو شوكة غائصة في الاتجاه العمودي على الليف لخشب مُقسًّى:

$$p = C\, D^{3/2} \qquad (6.34)$$

حيث:

p = الحمولة المسموحة بالمسمار أو بالشوكة lb (N).

D = قطر المسمار أو الشوكة، in (mm).

C = أمثال تعتمد على رقم زمرة الخشب (انظر الجدول (6.1).

وقيم C الخاصة بالزمر الأربعة التي يتم فيها تصنيف إجهادات العناصر الخشبية المنتظمة هي:

الزمرة I: C = 2,040

الزمرة II: C = 1,650

الزمرة III: C = 1,350

الزمرة IV: C = 1,080

تُطبَّق الحمولات مكان اختراق المسمار أو الشوكة في العنصر الذي تستوعب نقطة التحميل فيه 10 أقطار على الأقل بالنسبة لأصناف الزمرة I و11 قطر بالنسبة

لأصناف الزمرة II و13 قطر بالنسبة لأصناف الزمرة III و14 قطر بالنسبة لأصناف الزمرة IV. وتكون الحمولات المسموحة بالنسبة لإختراقات عددها أقل متناسبة مباشرة مع مقدار الاختراق، إلا أن الاختراق يجب أن يكون على الأقل مساوياً لثلث الاختراق المفترض.

البراغي (المسامير الحلزونية) الخشبية*

حمولة السحب المسموحة بالإنش (mm) لاختراق الجزء المفتوح فيه شرار من البرغي في الاتجاه العمودي على الليف للخشب المُقسَّى الذي يبقى جافاً هي:

$$p = 2{,}850\ G^2 D \qquad (6.35)$$

حيث

p = الحمولة المقبولة بالإنش (mm) لاختراق الجزء المفتوح فيه شرار في العنصر الذي يستقبل نقطة التحميل، lb (N).

D = قطر البرغي الخشبي، in (mm).

G = الثقل النوعي للخشب المجفف بالفرن (انظر الجدول 6.1).

يجب ألا تُحمّل البراغي الخشبية بحمولة سحب بدءاً من طرف الليف الخشبي.

الحمولة الجانبية المسموحة الكلية للبراغي الخشبية الغائصة في الاتجاه العمودي على ليف الخشب المُقسّى الذي يبقى محافظاً على جفافه هي:

$$p = CD^2 \qquad (6.36)$$

حيث

p = الحمولة المسموحة بالبرغي الخشبي الواحد، lb (N).

---

* من البديهي أن يتبادر للذهن بتعبير "البراغي أو المسامير الخشبية" أنها مخصصة للاستخدام في المنشآت الخشبية وليس براغي أو مسامير مصنوعة من الخشب.

D = قطر البرغي الخشبي، in (mm).

C = أمثال عددي يعتمد على رقم زمرة الخشب (الجدول 6.2).

الجدول 6.2 الوزن النوعي ورقم الزمرة لأصناف شائعة من القطع الخشبية.

الأصناف	رقم الزمرة	الوزن النوعي G	G^2	$G^{5/2}$
تنوب دوغلاس	II	0.51	0.260	0.186
صنوبر جنوبي	II	0.59	0.348	0.267
شوكران غربي	III	0.44	0.194	0.128
شوكران شرقي	IV	0.43	0.185	0.121
صنوبر نرويجي	III	0.47	0.221	0.151
خشب أحمر	III	0.42	0.176	0.114
خشب أبيض	IV	0.41	0.168	0.108

وقيم C المتعلقة بالزمر الأربع التي يكون فيها إجهاد العنصر منتظماً تُصنف وفق:

الزمرة I: C = 4,800

الزمرة II: C = 3,960

الزمرة III: C = 3,240

الزمرة IV: C = 2,520

وتكون قيمة الحمولة الجانبية المسموحة للبراغي الخشبية الغائصة في طرف الليف مساوية لثلثيْ قيمة الحمولة المسموحة للبراغي الغائصة بشكل عمودي على الليف.

تعديل قيم التصميم للوصلات المزودة بمثبتات (مسامير وبراغي)

Adjustment Of Design Values For Connections With Fasteners

يجب أن يتم ضرب قيم التصميم الاسمية، للوصلات أو للعناصر الخشبية المزودة بمثبتات (براغي ومسامير)، بعوامل التعديل القابلة للتطبيق المتاحة من قبل جمعيات الأخشاب ومراجع كتب الهندسة المدنية المساعدة من أجل الحصول على قيم التصميم المعدّلة. ويمكن أن تُقسم أنواع التحميل على المثبتات إلى أربعة صفوف:

التحميل الجانبي والتحميل السحبي والتحميل الموازي لليف الخشبي والتحميل العمودي عليه.

وقد تمّ إعطاء قيم التصميم المعدّلة باستخدام قيم التصميم الاسمية وعوامل التعديل في المعادلات اللاحقة. وتستخدم المتحولات التالية في المعادلات:

Z' = قيمة التصميم المعدلة للتحميل الجانبي.

Z = قيمة التصميم الاسمية للتحميل الجانبي.

W' = قيمة التصميم المعدّلة للتحميل السحبي.

W = قيمة التصميم الاسمية للتحميل السحبي.

P' = القيمة المعدّلة للتحميل الموازي لليف.

P = القيمة الاسمية للتحميل الموازي لليف.

Q' = القيمة المعدّلة للتحميل الناظمي على الليف.

Q = القيمة الاسمية للتحميل الناظمي على الليف.

من أجل الوصلات بالبراغي

$$Z' = Z\, C_D\, C_M\, C_t\, C_g\, C_\Delta$$

حيث

C_D = عامل فترة التحميل، ولا يتجاوز 1.6 للوصلات.

C_M = عامل الخدمة الرطب، غير قابل للتطبيق على المسامير المائلة المحملة بحمولة سحب.

C_t = عامل درجة الحرارة.

C_g = عامل فعل الزمرة.

C_Δ = العامل الهندسي.

من أجل وصلات بالحلقة المنفلقة والصفيحة القصية

$$P' = P\, C_D\, C_M\, C_t\, C_g\, C_\Delta\, C_d\, C_{st}$$

$$Q' = Q\, C_D\, C_M\, C_t\, C_g\, C_\Delta\, C_d$$

حيث: C_d عامل عمق الاختراق و C_{st} عامل الصفيحة المعدنية الجانبي.

من أجل الوصلات بالمسامير والمسامير الحلزونية (المفتوح فيها شرار)

$$W' = W\, C_D\, C_M\, C_t\, C_{tn}$$

$$Z' = Z\, C_D\, C_M\, C_t\, C_d\, C_{eg}\, C_{di}\, C_{tn}$$

حيث

C_{di} = عامل الارتقاق (الترقق).

C_{tn} = عامل المسمار المائل.

من أجل وصلات بالبراغي الخشبية

$$W' = W\,C_D\,C_M\,C_t$$

$$Z' = Z\,C_D\,C_M\,C_t\,C_d\,C_{eg}$$

حيث: C_{eg} = عامل الليف الطرفي.

من أجل وصلات ببراغي كبيرة

$$W' = W\,C_D\,C_M\,C_t\,C_{eg}$$

$$Z' = Z\,C_D\,C_M\,C_t\,C_g\,C_\Delta\,C_d\,C_{eg}$$

من أجل وصلات بصفيحة معدنية

$$Z' = Z\,C_D\,C_M\,C_t$$

من أجل وصلات بدسر (شوكات معدنية) ثقب ومسامير ثقب

$$W' = W\,C_D\,C_M\,C_t\,C_{eg}$$

$$Z' = Z\,C_D\,C_M\,C_t\,C_g\,C_\Delta\,C_d\,C_{eg}$$

من أجل وصلات بشبكة من الشوك المعدنية

$$Z' = Z\,C_D\,C_M\,C_t\,C_\Delta$$

إمالة (تمييل) السقف لمنع تكوّن برك الماء

Roof Slope To Prevent Ponding

يجب أن يكون للجيزان السقفية ميلان مستمر نحو الأعلى يكافئ 1/4 إنش/قدم (20.8 mm/m) بين المصرف وأعلى نقطة في السقف، بالإضافة إلى إحدداب

أصغري موصى به لتجنب تجمع المياه. عندما لا يكون للأسقف المسطحة ميلان كاف للتصريف (أقل من 1/4 ft/in) فلابد أن يكون للعناصر الحاملة قساوة بحيث لا تُسبب حمولة موزعة مقدارها $5\ lb/ft^2$ ($239.4\ N/mm^2$) تشوهاً يزيد عن $\frac{1}{2}$ إنش (12.7 mm).

بسبب تكون البرك أو الحمولات الثلجية أو الماء المحتجز بالمصدات الحصوية تقوم جدران الحجز أو الإغلاقات الجليدية المتشكلة بتضخيم الإجهادات والتشوّهات، عن طريق تكوّن حمولات سقفية، بالمقدار:

$$C_p = \frac{1}{1 - W'L^3 / \pi^4 EI}$$

حيث:

C_p = عامل خاص بجداء الإجهادات والتشوهات تحت تأثير الحمولات الموجودة لتعيين الإجهادات والتشوهات تحت تأثير الحمولات الموجودة زائد حمولات تكوّن البرك.

W = وزن مساحة واحد إنش (25.4 mm) من الماء على السقف المسنود بالجائز، مقدراً بـــ lb (N).

L = مجاز الجائز، in (mm).

E = عامل مرونة مادة الجائز، lb/in^2 (MPa).

I = عزم عطالة الجائز، in^4 (mm^4).

اعتمدت هذه الفقرة على المصدر:

Kuenzi and Bohannan, "Increases in Deflection and Stresses Caused by Ponding of Water on Roofs," Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin.)

الانعطاف والشد المحوري Bending And Axial Tension

لابد للعناصر الخاضعة إلى انعطاف مركب وشد محوري أن تكون متناسبة لتحقق معادلات تبادل الفعل:

$$\frac{f_t}{F'_c} + \frac{f_b}{F_b^*} \leq 1$$

و

$$\frac{(f_b - f_t)}{F_b^{**}} \leq 1$$

حيث

f_t = إجهاد الشد الناتج عن الشد المحوري الفاعل بمفرده.

f_b = إجهاد الانعطاف الناتج عن عزم الانعطاف بمفرده.

F'_t = القيمة التصميمية للشد مضروبةً بعوامل التعديل القابلة للتطبيق.

F^*_b = القيمة التصميمية للانعطاف مضروبةً بعوامل التعديل القابلة للتطبيق باستثناء C_L.

F_b^{**} = القيمة التصميمية للانعطاف مضروبةً بعوامل التعديل القابلة للتطبيق باستثناء C_V.

يمكن أن يستخدم عامل فترة التحميل C_D، المرتبط مع حمولة الفترة الأقصر في حالة تركيب الحمولات بفترات متفاوتة، لحساب F_t و F_b^*. ويجب أن تُقيّم جميع تركيبات الحمولة القابلة للتطبيق لتعيين تركيب الحمولة الحرجة.

الانعطاف والضغط المحوري
Bending And Axial Compression

يجب أن تكون العناصر الخاضعة إلى تركيب من الانعطاف والضغط المحوري (الأعمدة الجائزية) متناسبة لتحقق معادلة تبادل الفعل:

$$\left(\frac{f_c}{F'_c}\right)^2 + \frac{f_{b1}}{[1-(f_c / FcE_1)]F'_{b1}} + \frac{f_{b2}}{[1-(f_c / FcE_2)-(f_{b1} / F_{bE})^2]F'_{b2}} \le 1$$

حيث:

f_c = إجهاد الضغط الناتج عن الضغط المحوري الذي يفعل لوحده.

F'_c = القيمة التصميمية للضغط الموازي لليف مضروبةً بعوامل التعديل القابلة للتطبيق، المتضمنة عامل استقرارية العمود.

f_{b1} = إجهاد الانعطاف الخاص بالحمولة المطبقة على الوجه الضيّق للعنصر.

f_{b2} = إجهاد الانعطاف الخاص بالحمولة المطبقة على الوجه العريض للعنصر.

F'_{b1} = القيمة التصميمية للانعطاف العائد للحمولة المطبقة على الوجه الضيّق للعنصر مضروبة بعوامل التعديل القابلة للتطبيق، والمتضمنة عامل استقرارية العمود.

F'_{b2} = القيمة التصميمية للانعطاف العائد للحمولة المطبقة على الوجه العريض للعنصر مضروبة بعوامل التعديل القابلة للتطبيق، والمتضمنة عامل استقرارية العمود.

بما يخص الانعطاف ذا المحوّر الموحّد أو الثنائي المحور، يجب ألا تتجاوز f_c المقدار:

$$F_{cE_1} = \frac{K_{cE}E'}{(L_{e1} / d_1)^2}$$

حيث: 'E عامل المرونة مضروباً بعوامل التعديل. أيضاً يجب ألا تتجاوز f_c، العائدة للانعطاف الثنائي المحور، القيمة:

$$F_{cE_2} = \frac{K_{cE}E'}{(L_{e2} / d_2)^2}$$

ويجب ألا تزيد f_{b1} عن:

$$F_{bE} = \frac{K_{bE} E'}{R_B^2}$$

حيث: d_1 عرض الوجه العريض وd_2 عرض الوجه الضيّق. عامل النحافة R_B للجيزان قد سبق إعطاؤه في هذا المقطع. K_{bE} عُرِّفت في هذا المقطع سابقاً.

طولا العمود الفعّالان L_{e_1} للتحنيب في الاتجاه d_1 و L_{e_2} للتحنيب في الاتجاه d_2، E' و FcE_1 و FcE_2 يجب أن يتم تعيينها وفق ما تمّ توضيحه سابقاً.

وكما هو الحال بالنسبة للانعطاف المركب والشد المحوري، يجب أن يتم تعديل F'_c و F'_{b_1} و F'_{b_2} الخاصة بفترة الحمولة بتطبيق العامل CD.

7

صيغ علم المساحة التطبيقية

Surveying Formulas

Units Of Measurement واحدات القياس

واحدات القياس التي استخدمت سابقاً وحاضراً في الأعمال المساحية هي:

في الأعمال الإنشائية: القدم والإنشات وأجزاء الإنشات (m , mm).

في معظم الأعمال المساحية: القدم وأعشار القدم $\frac{1}{10}$ft والأجزاء المئوية من القدم $\frac{1}{100}$ft وأجزاء الآلاف من القدم $\frac{1}{1000}$ft ‏(m , mm).

في أعمال مسح شبكة التحكم العائدة للمساحة الجيوديزية القومية NGS: الأمتار و0.1، 0.01، 0.001 من المتر.

المترادفات الأكثر استخداماً هي:

1 متر = 39.37 إنش (in) (وبدقة يساوي) = 3.2808 قدم (ft).

1 قصبة (rod) = 1 (Pole) = 1 (Perch) = $16\frac{1}{2}$ قدم (ft) ‏(5.029 m).

1 سلسلة هندسية = 100 قدم (ft) = 100 حلقة (30.48 m).

1 سلسلة غَنتر (Gunter's chain) = 66 قدم ft ‏(20.11 m) = 100 حلقة غنتر (1 k) = 4 قصبة = $\frac{1}{80}$ ميل (mi) ‏(0.020 km).

1 إيْكر (acre) = 100,000 حلقة (غنتر)^2 = 43.560 قدم^2 (ft^2) = 160 قصبة^2 (rod^2) = 10 سلسلة (غنتر)^2 = 4046.87 متر^2 (m^2) = 0.4047 هكتار (ha).

1 رُود (rood) = $\frac{3}{4}$ إيكر (1011.5 متر^2) = 40 قصبة^2 (rod^2).

1 هكتار (ha) = 10,000 متر^2 (m^2) = 107,639.10 قدم^2 (ft^2) = 2.471 إيكرات (acres)

1 آربان (arpent) = حوالي 0.85 من الأيكر أو طول ضلع من 1 أربان^2 (حوالي 3439.1 m^2)

1 ميل إنكليزي أو قانوني (statute mi) = 5280 قدم (ft) = 1609.35 متر (m)

1 ميل^2 (mi^2) = 640 إيكرات (acres) = 258.94 هكتار (ha).

1 ميل بحري (U.S.) = 6080.27 قدم (ft) = 1853.248 متر (m).

1 فاذوم (fathom) = 6 قدم (ft) (1.829 متر (m)).

1 ذراع (cubit) = 18 إنش (in) (0.457 متر (m)).

1 فارا (vara) = 33 إنش (في ولاية كاليفورنيا) و $33\frac{1}{3}$ إنش في ولاية تكساس) يعني؛ 0.838 متر في كاليفورنيا و0.851 متر في تكساس.

1 درجة = $\frac{1}{360}$ من قوس الدائرة = 60 دقيقة (min) = 3600 ثانية (s) = = 0.01745 راديان (rad).

Sin 1° = 0.01745241

1 راديان (rad) = 57° 17' 44.8" أو حوالي 57.30°.

1 غراد (grad) = $\frac{1}{400}$ قوس دائري = $\frac{1}{100}$ قوس ربع الدائرة = 100 دقيقة مئوية (100 centesimal min) = 10^4 من التقسيم المئوي الفرنسي.

1 ميل (mil) = $\frac{1}{6400}$ قوس دائري = 0.05625°.

1 خطوة عسكرية (milpace) = $2\frac{1}{2}$ قدم (ft) (0.762 متر (m)).

Theory Of Errors نظرية الأخطاء

عندما يتم القيام بعدد من القياسات المساحية على نفس الكمية، فلابد من أن تُحلّل هذه القياسات بالاستناد على نظرية الاحتمال ونظرية الأخطاء.

بعد أن يتم حذف جميع الأخطاء النظامية (التراكمية)، يتم التحقق من الأخطاء العشوائية (المتكافئة) لتعيين القيمة الأكثر احتمالاً (القيمة المتوسطة) والقيم الحرجة الأخرى. وتتبع معظم هذه القيم الشائعة للصيغ المعينة من نظرية الإحصاء ومن منحني التوزيع الاحتمالي الطبيعي أو ذي الشكل الجرسي لغاوص (Gauss).

الانحراف المعياري لسلسلة من قياسات الرصد يساوي:

$$\sigma_s = \pm\sqrt{\frac{\sum d^2}{n-1}}$$

حيث:

d = الراسب أو المتبقي (الفرق عن القيمة الوسطى) لقياس رصد واحد و n = عدد قياسات الرصد.

الخطأ المحتمل لقياس رصد واحد فقط هو:

$$PE_s = \pm 0.6745\ \sigma_s$$

(الاحتمال الذي سيقع فيه الخطأ ضمن هذا المجال هو 0.50)

الاحتمال الذي سيقع فيه الخطأ بين قيمتين يُعطى بنسبة مساحة منحني الاحتمال المتضمنة بين القيمتين على المساحة الإجمالية. وبقدر ما تكون المساحة الواقعة تحت كامل منحني الاحتمال مساوية للواحدة، يوجد احتمال بنسبة 100 % أن جميع القياسات سوف تقع ضمن مجال المنحني.

مساحة المنحني بين القيمتين $\pm\ \sigma$ تساوي 0.683، بمعنى، أنه يوجد احتمال بنسبة 68.3 % أن يقع الخطأ بين القيمتين $\pm\ \sigma_s$ في قياس واحد فقط.

يدعى مجال الخطأ هذا بالسيغما واحد (one-sigma) أو بسوية ثقة % 68.3 أيضاً.

مساحة المنحني بين القيمتين $\pm 2\ \sigma_s$ تساوي 0.955. وهكذا يوجد احتمال 95.5% لوقوع الخطأ بين $\pm 2\ \sigma_s$ وأن إحدى القيمتين $\pm 2\ \sigma_s$ تمثل الخطأ بنسبة % 95.5 (سيغما - اثنان أو سوية ثقة % 95.5). وبطريقة مشابهة، $\pm 3\ \sigma_s$ تشير إلى الخطأ بنسبة % 99.7 (سيغما - ثلاثة أو سوية ثقة % 99.7).

بما يخص الأغراض التطبيقية، غالباً ما تفرض سوية التسامح العظمى مساوية إلى خطأ بنسبة % 99.9. يُبيّن الجدول 7.1 احتمال حدوث الأخطاء الأكبر في قياس واحد.

الجدول 7.1 احتمال الخطأ في قياس واحد فقط.

الخطأ	سوية الثقة، %	احتمال الخطأ الأكبر
المحتمل $(0.6745\ \sigma_s)$	50	1 in 2
الانحراف المعياري (σ_s)	68.3	1 in 3
90 % $(1.6449\ \sigma_s)$	90	1 in 10
$2\ \sigma_s$ or 95.5 %	95.5	1 in 20
$3\ \sigma_s$ or 97.7 %	99.7	1 in 370
Maximum $(3.29\ \sigma_s)$	99.9 +	1 in 1000

الخطأ المحتمل لتأثيرات الأخطاء العرضية المركبة الناتجة عن أسباب مختلفة يُعطى بـ:

$$E_{sum} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots}$$

حيث: E_1، E_2، E_3، ... هي الأخطاء المحتملة للقياسات المستقلة (قياسات منفصلة)

خطأ القيمة الوسطية يُعطى بـ:

$$E_m = \frac{E_{sum}}{n} = \frac{E_s \sqrt{n}}{n} = \frac{E_s}{\sqrt{n}}$$

حيث: E_s = الخطأ المُميّز لقياس منفرد واحد فقط.

والخطأ المحتمل للقيمة الوسطية هو:

$$PE_m = \frac{PE_s}{\sqrt{n}} = \pm 0.6745\sqrt{\frac{\sum d^2}{n(n-1)}}$$

قياس المسافة بالأشرطة

Measurement Of Distance With Tapes

الدقات المعقولة لمختلف طرق قياس المسافات هي:

دقة القياس بالخطوة (على أرض ذات تضاريس عادية): $\frac{1}{50}$ إلى $\frac{1}{100}$.

دقة القياس بالشريط (شريط فولاذي عادي): $\frac{1}{1000}$ إلى $\frac{1}{10,000}$ (يمكن تحسين النتائج باستخدام أداة شد ومد استقامات انتقالية (عبور) وأداة تسوية.)

دقة القياس بخط القاعدة أو الدليل (شريط من الإنفار): $\frac{1}{50,000}$ إلى $\frac{1}{1,000,000}$.

دقة القياس بالستاديميتر (Stadia): $\frac{1}{300}$ إلى $\frac{1}{500}$ (مع استخدام إجراءات خاصة)

دقة القياس بالضلع العرضي المقابل (ميرا أفقية): $\frac{1}{1000}$ إلى $\frac{1}{7000}$ (من أجل مسافات قصيرة ودوران مضاعف واحد بالتيودوليت مع متوسط الزوايا المأخوذة من كلا الطرفين).

أضحت أجهزة قياس المسافات الإلكترونية (EDM) قيد الاستخدام منذ منتصف القرن العشرين وقد أخذت مكان القياسات بالشريط الفولاذي على نحو واسع في المشاريع الضخمة. فلقد جعل التطور المستمر والحصول على نتائج متناهية الدقة استخدامها واسعاً. ومهما يكن، تبقى معرفة أخطاء القياس بالشريط الفولاذي

* نذكر مرة أخرى أن الفارزة أو الفاصلة (,) الموجودة بين الأرقام تفصل بين خانة الألاف. (المعدّ)

والتصحيحات أمراً ضرورياً لأن استخدام بيانات المسح السابقة تحتاج لمعرفة كيف تمت القياسات وما هي المصادر العامة للأخطاء والتصحيحات التي كانت مطلباً نموذجياً.

بما يخص طريقة القياس بالشريط العادي، يجب أن يستخدم شريط قياس تصل دقته إلى 0.01 قدم (0.00305 متر). ويجب أن يكون الشريط مشدوداً بقوة تساوي حوالي 15 ليبرة (66.7 نيوتن). ويجب أن تكون درجة الحرارة ضمن حد 10° F (5.56 C°) وميل الأرض ضمن حد 2 % ومن ثم تطبيق التصحيحات الملائمة. فالتصحيح المطبق على درجة الحرارة عند استخدام الشريط الفولاذي هو:

$$C_t = 0.0000065s\,(T - T_0)$$

والتصحيح المطبق على القياسات على منحدر أرضي هو:

$$C_h = s\,(1 - \cos\theta) \quad \text{دقيق}$$

أو

$$C_h = 0.00015s\,\theta^2 \quad \text{تقريبي}$$

أو

$$C_h = h^2/2s \quad \text{تقريبي}$$

حيث:

C_t = تصحيح درجة الحرارة على الطول المقاس، مقدراً بـــ ft (m).

C_h = التصحيح المطروح من المسافة المائلة، ft (m).

s = الطول المقاس، ft (m).

T = درجة الحرارة التي أُخذت عندها القياسات F° (C°).

T_0 = درجة الحرارة التي يكون عندها شريط القياس معيارياً (دون تمدد أو تقلص)، مقدرة بـــ F° (C°).

h = الفرق في الارتفاع عند نهايتي المسافة المقاسة، ft (m).

θ = زاوية الميل، بالدرجة.

وفي طرق القياس بالشريط الأكثر دقة، باستخدام الشريط المعياري (النظامي) عندما يكون محمولاً على امتداده كاملاً، يجب أن تتم التصحيحات أيضاً على الشد وشروط حمل الشريط أو رفعه بمساند على عدة مستويات أو مستوٍ أفقي واحد تقريباً.

تصحيح الشد:

$$C_P = \frac{(P_m - P_s)s}{SE}$$

تصحيح ارتخاء الشريط عندما لا يكون مسنوداً بشكل كلي:

$$C_s = \frac{w^2L^2}{24P_m^2}$$

حيث:

C_P = تصحيح الشد للطول المقاس، ft (m).

C_s = تصحيح الارتخاء للطول المقاس من أجل كل مقطع غير مسنود من الشريط مقدراً بـــ ft (m).

P_m = الشد الفعلي، lb (N).

P_s = الشد الذي يكون فيه الشريط في الحالة العيارية، lb (N) (وعادة تكون 10 ليبرة) (حوالي 44.4 نيوتن).

S = مساحة المقطع العرضي للشريط، in^2 (mm^2).

E = عامل مرونة الشريط، lb/in^2 (MPa). (29 مليون $\frac{\text{ليبرة}}{\text{إنش}^2}$ للفولاذ) (حوالي 199.955 MPa).

w = وزن الشريط بواحدة الطول، lb/ft ‏(Kg/m).

L = الطول اللامسنود ، ft ‏(m).

تصحيحات الميل (انحدار الأرض)

عند القيام بالقياسات على المنحدر، تساوي المسافة الأفقية (المقاسة في المستوي الأفقي) $L.Cos\ x = H$، حيث L = المسافة المائلة و x = الزاوية الشاقولية، وتنجز عملية الحساب باستخدام حاسبة يدوية بسيطة. وبما يخص المنحدرات ذات الميل 10 % أو أقل، يمكن أن يحسب التصحيح الواجب تطبيقه على L بسبب فرق الارتفاع d بين نهايتي الشريط من:

$$C_s = \frac{d^2}{2L}$$

أمّا بما يخص المنحدر الذي يزيد ميله عن 10 %، فيمكن أن يتم تعيين C_s من:

$$C_s = \frac{d^2}{2L} + \frac{d^4}{8L^3}$$

تصحيحات درجة الحرارة

من أجل طول شريط غير صحيح:

$$C_t = \frac{(\text{طول الشريط الفعلي} - \text{طول الشريط الاسمي})\ L}{\text{طول الشريط الاسمي}}$$

ومن أجل شد غير قياسي (لا عياري):

$$C_t = \frac{(\text{الشد المطبق} - \text{الشد المعياري})\ L}{AE}$$

حيث:

A = مساحة المقطع العرضي للشريط، in^2 (mm^2).

E = عامل المرونة = 29,000,00 lb/in^2 (199,955 MPa) للفولاذ.

وبما يخص تصحيح الارتخاء بين نقاط استناد الشريط، مقدراً بـــ ft (m):

$$C = -\frac{w^2 L_s^3}{24p^2}$$

حيث:

w = وزن الشريط بالقدم الطولي، lb (N).

L_s = الطول اللامسنود للشريط، ft (m).

p = الشد المطبق على الشريط، lb (N).

التصحيح الأورثومتري

يُطبق هذا التصحيح على الارتفاعات الأولية الناشئة عن تفلطح الأرض في الاتجاه القطبي. وتكون قيمته تابعة لزاوية خط العرض وارتفاع فرق سوية إغلاق دارة المضلع. بسبب انحناء الأرض يبتعد خط الأفق عن سطح السوية. ويمكن أن يحسب الابتعاد C_f بالقدم أو C_m بالمتر من:

$$C_f = 0.667M^2 = 0.0239\ F^2$$

$$C_m = 0.0785\ K^2$$

حيث: M المسافة بالأميال وF المسافة بآلاف الأقدام وK المسافة بالكيلومترات)، وذلك عن نقطة تماس سطح الأرض.

يؤدي انكسار الأشعة الضوئية، المارة من الغلاف الجوي للأرض، إلى انحناء هذه الأشعة مع انحناء سطح الأرض. وبما يتعلق بالرؤى (بالأرصاد) الأفقية، تكون الإزاحة الزاوية المتوسطة (كما في حالة رصد قطر الشمس) حوالي 32 دقيقة. وتُعطى الإزاحة R_f بالقدم أو R_m بالمتر بالعلاقة التقريبية:

$$R_f = 0.093\ M^2 = 0.0033\ F^2$$

$$R_m = 0.011\ K^2$$

ولكي تحصل على التأثير المركب من الانكسار وانحناء الأرض، قم بطرح R_f من C_f أو قم بطرح R_m من C_m.

التسوية المتعلقة بالمقطع العرضي أو ما يسمى بتسوية حساب حُفر الاستعارة (الإمداد) تعطي فروقاً في الارتفاعات عند زوايا المربعات أو المستطيلات التي يعتمد طول أضلاعها على المساحة الواجب تغطيتها وعلى تضاريس الأرض وعلى الدقة المرغوبة.

فمثلاً يمكن أن يكون طول الأضلاع 10 أو 20 أو 40 أو 50 أو 100 قدم (3.048 أو 6.09 أو 12.19 أو 15.24 أو 30.48 متر).

ويمكن أن يتم وضع خطوط التسوية بسهولة إلا أن المعالم أو الرموز الطبوغرافية ليست بهذه السهولة. تُحسب كمية المادة، ft^3 (m^3)، التي ستحضر أو التي ستملأ عن طريق اختيار تدرج منتظم بالارتفاع أو باختيار ارتفاع الأرض النهائي ثم بحساب فروق الارتفاع عند الزوايا وتعويضها بالعلاقة:

$$Q = \frac{nxA}{108}$$

حيث

n = عدد المرات التي تدخل فيها زاوية معينة كجزء من الجسم الترابي المقسم (باعتبار أن الحجم الترابي الكلي مقسم إلى بلوكات أو مجموعة من الكتل الترابية).

x = الفرق في المنسوب بين الأرض والارتفاع المتدرج عند كل زاوية، ft (m).

A = مساحة كل كتلة ترابية مقسمة (باعتبار أن الحجم الكلي مقسم إلى كتل ترابية)، ft^2 (m^2).

شبكة التحكم الشاقولية Vertical Control

تُعطي المساحة الجيوديزية القومية (NGS) شبكة تحكم شاقولية من أجل جميع أنواع الأعمال المساحية. فالـ NGS تزودنا بمواصفات وارتفاعات علامات المنسوب المرجعية عند الطلب. ووفق ما هو مُعطى في "القياسات والمواصفات النظامية في شبكات التحكم الجيوديزية" العائدة لجمعية إدارة الشبكة الجيوديزية الفيدرالية، تكون الدقة النسبية C المطلوبة بين علامات المنسوب المتصلة مع بعضها مباشرةً وذلك من أجل تسوية من ثلاث مراتب، مقدرة بـ mm:

المرتبة الأولى: $C = 0.5\sqrt{K}$ للصنف I و $C = 0.7\sqrt{K}$ للصنف II.

المرتبة الثانية: $C = 1.0\sqrt{K}$ للصنف I و $C = 1.3\sqrt{K}$ للصنف II.

المرتبة الثالثة: $C = 2.0\sqrt{K}$.

حيث: K المسافة بين علامات المنسوب مقدرة بـ Km.

المسح الستاديمتري Stadia Surveying

عند القيام بالمسح الستاديمتري، يُستخدم التيودوليت ذو الشُعيْرات التصالبية الأفقية الستاديمترية الموجودة فوق وأسفل الشعيرة المتصالبة الأفقية المركزية.

يُسمى الفرق في قراءتي الشاخصة الموافقتين للشعيْرات الستاديمترية، بطول الشاخصة المعترض. ويمكن للطول المعترض أن يُحوَّل إلى المسافتين الأفقية والشاقولية بين الجهاز والشاخص عن طريق الصيغ التالية:

$$H = Ki\,(Cos\ a)^2 + (f + c)\ Cos\ a$$

$$V = \frac{1}{2} Ki(Sin\ 2a) + (f + c) Sin\ a$$

حيث:

H = المسافة الأفقية بين مركزيْ التيودوليت والشاخص، ft (m).

V = المسافة الشاقولية بين مركز التيودوليت والنقطة الواقعة على الشاخص المتقاطعة مع الشُعيْرة المتصالبة الوسطية الأفقية، ft (m).

K = العامل الستاديمتري (عادة يساوي 100).

i = الطول الاعتراضي على الشاخصة، ft (m).

a = الميل الشاقولي لمستقيم الرؤية (خط الرصد)، مقاساً بدءاً من خط الأفق، ومقدراً بالدرجات.

f + c = ثابت الجهاز، ft (m). (يؤخذ عادة مساوياً لـــ 1 قدم (0.3048 m).

تُحسب المسافات عادةً، باستخدام هذه الصيغ، بالأقدام (بالأمتار) أما الفروقات في الارتفاع فتحسب بأعشار القدم $\left(\frac{1}{10}\text{من المتر}\right)$.

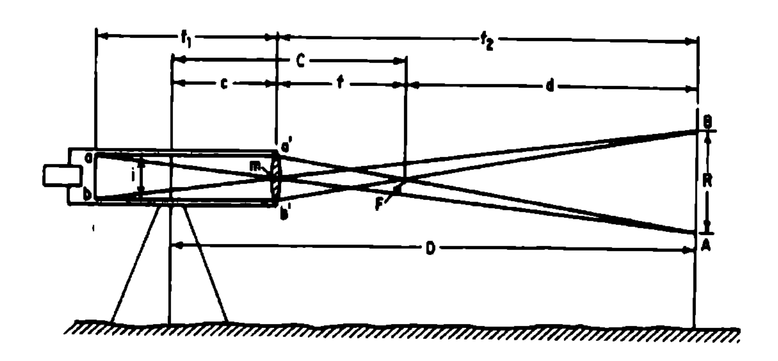
يُبيّن الشكل 7.1 العلاقات الستاديمترية الخاصة بالرصد الأفقي باستخدام نوع قديم من تلسكوب ذي إحكام محرقي داخلي. ويمكن لتلك العلاقات الستاديمترية المتبادلة أن تقارن مع تلك العلاقات العائدة لتلسكوبات ذات إحكام محرقي داخلي.

تساوي المسافة الستاديمترية في حالة الرصد الأفقي (من محور دوران الجهاز إلى الشاخصة)، مقدرة بـــ ft (m)، إلى:

$$D = R\frac{f}{i} + c$$

حيث:

R = الطول الاعتراضي (المقابل) على الشاخص بين نقطتي توقيع الشُعيرتين، ft (m).



الشكل 7.1 المسافة D مقاسة باستخدام تلسكوب ذي إحكام محرقي خارجي عن طريق تعيين مجال طول الاعتراض R على الشاخص AB بواسطة شُعيْرتي سلكي نقطتي الرصد الأفقي a و b.

f = البعد المحرقي للتلسكوب، ft (m) (وهو ثابت في بعض الأجهزة الخاصة).

i = المسافة بين شُعيْرتي الستاديمتر، ft (m).

$c + f = C$

c = المسافة من مركز محور دوران الجهاز إلى مركز جسم العدسة، ft (m).

يسمى الثابت C بالثابت الستاديمتري، بالرغم من أن c و C تتغيران على نحوٍ ضئيل.

قيمة العامل الستاديمتري f/i تُجهّز من قبل المصنع لتساوي حوالي 100، إلا أنها ليست من الضروري أن تساوي الـ 100. وهذه القيمة يجب أن يتم اختبارها قبل استخدامها في أعمال هامة أو عندما تكون الشعيرتان أو العينيتان قد تم استبدالهما بعد أن أصيبتا بضرر.

الفوتوغرامتري Photogrammetry

الفوتوغرامتري هو علم وفن الحصول على قياسات ذات طابع موثوق عن طريق التصوير الفوتوغرافي (فوتوغرامتري متري) والتقييم الكمي لبيانات الصورة (تفسير تصويري). إذ أنه يتضمن استخدام الصور الأرضية وذات المدى القريب والجوية والشاقولية والمائلة والشريطية والفضائية مع تفسيراتها.

تُعطى صيغ المقياس وفق ما يلي:

$$\frac{\text{مقياس الصور}}{\text{مقياس الخريطة}} = \frac{\text{المسافة على الصورة}}{\text{المسافة على الخريطة}}$$

$$\text{مقياس الصورة} = \frac{ab}{AB} = \frac{f}{H - h_1}$$

حيث:

f = البعد المحرقي للعدسة، in (m).

H = ارتفاع التحليق للطائرة فوق المستوي المرجعي (عادة يكون المستوي الوسطي للبحار)، ft (m).

h_1 = ارتفاع النقطة أو الخط أو المساحة وذلك بالنسبة للمستوي المرجعي، ft (m).

8

الصيغ الخاصة بالتربة
والأعمال الترابيّة

Soil And Earthwork Formulas

Physical Properties Of Soils الخصائص الفيزيائية للترب

يمكن أن تُقسم الخصائص الأساسية للتربة ووسطائها إلى صفوف فيزيائية ودليليّة وهندسية. فتتضمن الخصائص الفيزيائية للتربة الكثافة وحجم الجزيئات وتوزعها والوزن النوعي والمحتوى المائي.

يُمثل المحتوى المائي w لعينة ترابية وزن الماء الحر المتضمن في عينة مُعبَّر عنه بنسبة مئوية من وزنها الجاف.

وتكون درجة الإشباع S لعينة النسبة، المُعبَّر عنها مئوياً، لحجم الماء الحر المتضمن في العينة إلى حجم فراغاتها الجزئية الإجمالي V_v.

وتكون المسامية n، قياس الكمية النسبية للفراغات الجزئية، هي نسبة حجم الفراغ الجزئي إلى الحجم الإجمالي V للتربة:

$$n = \frac{V_v}{V} \qquad (8.1)$$

إن نسبة الحجم V_v إلى الحجم المشغول من قبل جزيئات التربة V_s تُعرّف نسبة الفراغ e. فبإعطاء نسبة الفراغ e (Void ratio) يمكن أن تُحسب درجة الإشباع من:

$$S = \frac{wG_s}{e} \qquad (8.2)$$

حيث: G_s تمثل الوزن النوعي لجزيئات (حبيبات) التربة. وتكون G_s، بالنسبة لمعظم الترب اللاعضوية، عادةً، واقعة ضمن مجال يتراوح ما بين 2.67 ± 0.05.

يمكن أن تُحسب واحدة الوزن الجاف γ_d لعينة ترابية نموذجية، بأي درجة إشباع كانت، من:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w G_s S}{1 + wG_s} \qquad (8.3)$$

حيث: γ_w واحدة وزن الماء وتؤخذ عادة 62.4 ليبرة/قدم^3 ($1001\ Kg/m^3$) من أجل الماء العذب و64.0 ليبرة/قدم^3 ($1026.7\ Kg/m^3$) من أجل الماء المالح.

الوسطاء الأدلة للترب Index Parameters For Soils

تتضمن الوسطاء الأدلة للترب المتماسكة حد السيولة وحد اللدونة وحد التقلص (الانكماش) ودرجة نشاط التربة. ويكون هذا النوع من الوسطاء مفيداً لتصنيف الترب المتماسكة بالإضافة إلى إعطائها العلاقات المتبادلة بين الخصائص الهندسية للتربة.

يُمثّل حد السيولة للترب المتماسكة الحالة الأقرب للسيلان، بمعنى أنه تساوي مقاومة القص اللامصرفة (قوة القص المطبقة على عينة لم تجف بعد) حوالي 0.01 ليبرة/قدم^2 (0.0488 كغ/متر^2). المحتوى المائي الذي تتوقف عنده التربة عن إظهار السلوك اللدن يسمى بحد اللدونة. بينما يمثل حد التقلص المحتوي المائي الذي لن يحدث عنده تغير إضافي (نقصان) في الحجم وذلك مع تقليل محتوى الماء.

إن الوسطاء الأكثر نفعاً في التصنيف وإيجاد الروابط المتبادلة هي دليل اللدانة I_p ودليل السيولة I_l ودليل التقلص I_s والنشاط A_c. هذه الوسطاء مُعرَّفة في الجدول 8.1.

الجدول 8.1 أدلّة التربة

الدليل	التعريف*	العلاقة المتبادلة
Plasticity اللدانة	$I_p = W_l - W_p$	المقاومة، الانضغاطية، الارتصاص، ... الخ
Liquidity السيولة	$I_l \dfrac{W_n - W_p}{I_p}$	معدّل الإجهاد والانضغاطية
Shrinkage التقلص	$I_s = W_p - W_s$	الطاقة الكامنة للتقلص
Activity النشاط	$A_c = \dfrac{I_p}{\mu}$	طاقة الانتفاخ الكامنة، ... الخ

* W_l = حد السيولة؛ W_p = حد اللدانة؛ W_n = محتوى الرطوبة %؛ W_s = حد التقلص؛

μ = نسبة حبيبات التربة الناعمة ذات الأقطار الأقل من 0.002 mm (حبيبات الترب الغضارية).

يمكن أن يتم التعبير عن الكثافة النسبية D_r للترب اللاامتماسكة باستخدام نسبة الفراغ e أو باستخدام واحدة الوزن الجاف γ_d:

$$D_r = \frac{e_{max} - e_o}{e_{max} - e_{min}} \qquad (8.4)$$

$$D_r = \frac{1/\gamma_{min} - 1/\gamma_d}{1/\gamma_{min} - 1/\gamma_{max}} \qquad (8.5)$$

تُعطي D_r خاصية التربة اللاامتماسكة ووسطاء علاقاتها المتبادلة التي تتضمن زاوية الاحتكاك والتساهل أو حد التسامح والانضغاطية وعامل الانفعال-القص الأصغري ومقاومة القص الدورية، ... الخ.

العلاقات بين الأوزان والحجوم في الترب

Relationship Of Weights And Volumes In Soils

يتغير وزن واحدة الحجم للتربة تبعاً لكمية الماء المحتواة في التربة. فتستخدم عموماً أوزان واحدات الحجم الثلاثة التالية:

وزن واحدة الحجم المشبعة γ_{sat} ووزن واحدة الحجم الجاف γ_{dry} ووزن واحدة الحجم العائم γ_b (وتسمى كذلك بوزن واحدة الحجم المغمور):

$$\gamma_{sat} = \frac{(G+e)\gamma_o}{1+e} = \frac{(1+w)G\gamma_o}{1+e} \quad ; \quad S = 100\%$$

$$\gamma_{dry} = \frac{G\gamma_o}{(1+e)} \quad ; \quad S = 0\%$$

$$\gamma_b = \frac{(G-1)\gamma_o}{1+e} \quad ; \quad S = 100\%$$

يُعبّر عن وزن الواحدات الحجمية عادةً بـــ باوند بالقدم[3] أو بـــ غرام بالسنتيميتر[3].

القيم النموذجية لأوزان الواحدات الحجمية، من أجل تربة وزنها النوعي 2.73 ونسبة الفراغات فيها 0.80، تكون:

$$\gamma_{sat} = 122\ lb/ft^3 = 1.96\ g/cm^3$$

$$\gamma_{dry} = 95\ lb/ft^3 = 1.52\ g/cm^3$$

$$\gamma_b = 60\ lb/ft^3 = 0.96\ g/cm^3$$

الرموز المستخدمة في المعادلات الثلاثة السابقة وكذا في الشكل 8.1 هي:

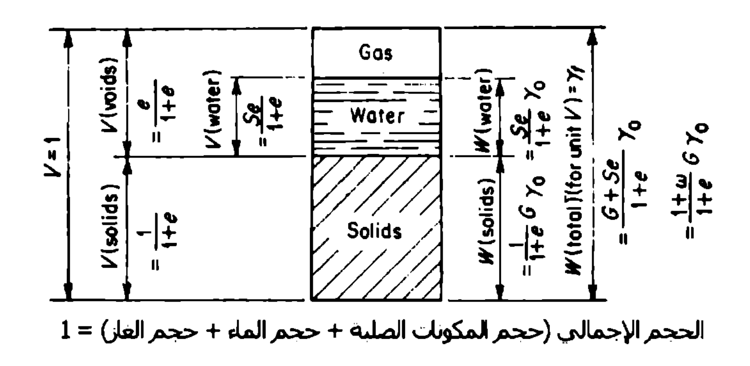
G = الوزن النوعي للمكونات الصلبة للتربة ويُعرَّف بأنه وزن واحدة الحجم الصلب إلى وزن واحدة الحجم للماء المقطر في الدرجة $4\ C° +$ (الوزن النوعي للكوارتز 2.67؛ ويكون الوزن النوعي لأكثرية الترب ضمن مجال يتراوح بين 2.65 و2.85؛ وتمتلك الترب العضوية أوزاناً نوعية أقل قيمة).

γ_o = وزن واحدة الحجم للماء وتساوي $62.4\ lb/ft^3$ ($1.0\ g/cm^3$).

e = نسبة الفراغ، وهي حجم الفراغات في كتلة التربة مقسومة على حجم المكونات الصلبة لنفس الكتلة، وتساوي أيضاً إلى $n/(1-n)$، حيث n هي المساميّة وتُعرف بأنها حجم الفراغات في كتلة ترابيّة مقسومة على الحجم الكلي لنفس الكتلة.

S = درجة الإشباع، وهي حجم الماء في الكتلة الترابية مقسومة على حجم الفراغات في نفس الكتلة.

w = المحتوى المائي، وهو وزن الماء في كتلة التربة مقسوماً على وزن المكونات الصلبة في نفس الكتلة ويساوي أيضاً إلى Se/G.



الشكل 8.1 علاقة الأوزان والحجوم في التربة.

Internal Friction And Cohesion الاحتكاك الداخلي والتماسك

يُعبَّر عن زاوية الاحتكاك الداخلية للتربة بـــ:

$$\tan\phi = \frac{\tau}{\sigma}$$

حيث:

ϕ = زاوية الاحتكاك الداخلي.

$\tan\phi$ = أمثال الاحتكاك الداخلي.

σ = القوة الناظمية المؤثرة على مستوٍ مفروض في كتلة ترابية لا متماسكة.

τ = قوة القص المؤثرة على نفس المستوي عندما يكون الانزلاق على المستوي على وشك الحدوث.

بما يخص الترب الرملية الخشنة والمتوسطة الخشونة تكون زاوية الاحتكاك الداخلي واقعة ما بين 30° إلى 35°. أما زاوية الاحتكاك الداخلي للترب الغضارية فتتراوح عملياً من 0° إلى 20°.

تماسك التربة هو عبارة عن مقاومة القص التي تمتلكها التربة بوساطة ضغطها الذاتي. وتكون قيمة مقاومة التماسك الحدّية للتربة، مُعينة عادةً بـــ c.

بعض القيم الوسطية لـــ c تمّ سردها في الجدول 8.2.

الجدول 8.2 مقاومة التماسك لأنواع مختلفة من الترب

النوع العام للتربة	التماسك c	
	lb/ft^2	(kPa)
Almost-liquid clay غضار مائل للسيلان	100	(4.8)
Very soft clay غضار طري جداً.	200	(9.6)
Soft clay غضار طري	400	(19.1)
Medium clay غضار متوسط	1000	(47.8)
Damp, muddy sand رمل رطب موحل	400	(19.1)

الضغوط الشاقولية في الترب Vertical Pressures In Soils

يمكن أن يتم تحديد الإجهاد الشاقولي في التربة الذي تسببه حمولة شاقولية مركزة على السطح وبدقة كافية عن طريق استخدام نظرية المرونة. هنالك معادلتان شائعتا الاستخدام، هما معادلتا بوسينيسك - Boussinesq وويسترغارد - Westergaard. تطبق معادلة بوسينيسك على الكتلة المرنة المتجانسة الموحدة الخواص في كل الاتجاهات والممتدة إلى اللا نهاية في جميع الاتجاهات بدءاً من سطح السوية. ويكون الإجهاد المؤثر عند نقطة ما في الكتلة:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2}\left[1+\left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}$$

تطبق معادلة ويسترغارد على المادة المرنة المسلحة جانبياً بصفائح أفقية ذات ثخانة ضئيلة جداً وصلابة لا نهائية بحيث تحول دون أن تتلقى الكتلة انفعالاً جانبياً

(أفقياً). ويساوي الإجهاد الشاقولي المؤثر في نقطة ما من الكتلة، بافتراض أن عامل بواسون صفر، إلى:

$$\sigma_z = \frac{P}{\pi z^2}\left[1+2\left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{3/2}$$

حيث:

σ_z = الإجهاد الشاقولي المؤثر في النقطة، lb/ft^2 (KPa).

P = الحمولة السطحية الإجمالية المركزة، lb (N).

z = عمق النقطة التي يؤثر فيها الإجهاد σ_z، مقاساً بالاتجاه الشاقولي نحو الأسفل بدءاً من السطح، ft (m).

r = المسافة الأفقية بدءاً من نقطة مرتسم (مسقط) الحمولة السطحية P إلى النقطة التي يؤثر فيها σ_z، ft (m).

تعطي معادلة ويستر غارد، من أجل قيم لـــ r/z واقعة بين 0 و1، إجهادات تقل وعلى نحو ملحوظ عن تلك الإجهادات التي تعطيها معادلة بوسينيسك.

أما من أجل قيم لـــ r/z أكبر من 2.2، فسوف تعطي كلتا المعادلتين إجهادات أقل من $P/100\ z^2$.

الضغوط الجانبية المؤثرة في الترب والقوى المؤثرة على الجدران الاستنادية

Lateral Pressures In Soils, Forces On Retaining Walls

تَفتَرِضُ نظرية الضغوط الجانبية (الأفقية) للتربة العائدة لـــ رانكين Rankine، والمستخدمة من أجل تقدير القيم التقريبية للضغوط الجانبية المؤثرة على الجدران

الاستنادية، بأن الضغط المؤثر على الوجه الخلفي (الوجه الترابي) لجدار شاقولي هو نفس ذلك الضغط الموجود المؤثر على مستوٍ شاقولي في كتلة ترابية لا نهائية.

ويكون الاحتكاك بين الجدار والتربة مهملاً. ويتكوّن الضغط المؤثر على الجدار من:

(1) الضغط الجانبي للتربة الذي يعبأ به الجدار.

(2) ضغط الماء (إن وجد) خلف الجدار.

(3) الضغط الجانبي الناتج عن أي تحميل إضافي على التربة خلف الجدار.

الرموز المستخدمة في هذا المقطع هي:

γ = وزن واحدة الحجم للتربة، lb/ft^3 (Kg/m^3) (وهي إمّا وزن واحدة الحجم المشبع أو وزن واحدة الحجم الجاف أو وزن واحدة الحجم المغمور وذلك تبعاً للشروط).

P = قوة الدفع الأفقية للتربة مقدرة بـــ ليبرة/قدم طولي (كغ/متر طولي) على الجدار.

H = الارتفاع الكلي للجدار، ft (m).

ϕ = زاوية الاحتكاك الداخلية للتربة، مقدرة بالدرجات.

i = زاوية ميل سطح الأرض خلف الجدار مع المستوي الأفقي، أيضاً زاوية ميل خط فعل قوة الدفع الجانبية P والضغوط المؤثرة على الجدار مع المستوي الأفقي.

K_A = أمثال الضغط الفعّال.

K_P = أمثال الضغط اللافعّال (العكسي).

C = التماسك، lb/ft^2 (KPa).

الضغط الجانبي للترب اللاامتماسكة

Lateral Pressure Of Cohesionless Soils

تُعطى قوة الدفع الأفقية الإجمالية المؤثرة، من قبل التربة على الجدران التي تعبأ بحجز ترب لا متماسكة وحُرّة الحركة إلى حد ملحوظ، بالعلاقة:

$$P = \frac{1}{2}\gamma H^2 \text{Cosi}\frac{\text{Cosi} - \sqrt{(\text{Cosi})^2 - (\text{Cos}\phi)^2}}{\text{Cosi} + \sqrt{(\text{Cosi})^2 - (\text{Cos}\phi)^2}}$$

وعندما يكون السطح (سطح التربة) خلف الجدار سطح سوية (مستوياً أفقياً)، تكون قوة الدفع الأفقية:

$$P = \frac{1}{2}\gamma H^2 K_A$$

حيث: $K_A = \left[\tan\left(45° - \frac{\phi}{2}\right)\right]^2$

تُطبّق قوة الدفع الأفقية عند النقطة H/3 فوق قاع الجدار، ويكون الضغط الموزع مثلثياً بضغط أعظمي $\frac{2P}{H}$ واقعاً عند أسفل الجدار.

وبما يخص الجدران التي تعبأ بحجز ترب لا متماسكة وحرة الحركة إلى حد ضئيل فقط، تساوي فوة الدفع الأفقية إلى 1.12 P، حيث P مُعرّفة سابقاً.

تُطبق قوة الدفع الأفقية عند النقطة الوسطية من الجدار ويكون الضغط الموزع شبه منحرفاً، بضغط أعظمي يساوي 1.4 P/H يمتد فوق الـ $\frac{6}{10}$ الوسطى من ارتفاع الجدار.

أما الجدران التي تعبأ بحجز ترب لا متماسكة ومعاقة الحركة تماماً (حالة نادرة جداً)، فتكون قوة الدفع الأفقية الإجمالية المؤثرة من قبل التربة على الجدار:

$$P = \frac{1}{2}\gamma H^2 Cosi \frac{Cosi + \sqrt{(Cosi)^2 - (Cos\phi)^2}}{Cosi - \sqrt{(Cosi)^2 - (Cos\phi)^2}}$$

وعندما يكون السطح (سطح الأرض) خلف الجدار أفقياً، تكون قوة الدفع الأفقية:

$$P = \frac{1}{2}\gamma H^2 K_P$$

حيث:

$$K_P = \left[\tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)\right]^2$$

تُطبق قوة الدفع الأفقية عند النقطة $\frac{H}{3}$ فوق قاعدة الجدار، ويكون توزع الضغط مثلثياً، وبضغط أعظمي يساوي $\frac{2P}{H}$ يحدث عند أسفل الجدار.

الضغط الجانبي للترب المتماسكة
Lateral Pressure Of Cohesive Soils

الجدران التي تعبأ بحجز ترب متماسكة وحرة الحركة إلى حد ملحوظ على امتداد فترة زمنية طويلة، تكون قوة الضغط الأفقية المؤثرة عليها من قبل التربة (بافتراض أن سطحها أفقي أو بتعبير أدق سطح سوية) معطاة بالعلاقة:

$$P = \frac{1}{2}\gamma H^2 K_A - 2cH\sqrt{K_A}$$

أو، لأن الترب العالية التماسك تمتلك عموماً زوايا احتكاك داخلية صغيرة، تكون P معطاة بالعلاقة:

$$P = \frac{1}{2}\gamma H^2 - 2cH$$

وتكون قوة الدفع الأفقية مطبقة عند نقطة تقع أسفل المسافة $\frac{H}{3}$ بقليل والمقاسة بدءاً من قاعدة الجدار ويكون توزع الضغط مثلثياً على وجه التقريب.

أمّا بما يخص الجدران التي تعبأ بحجز ترب متماسكة وحرة الحركة بمقدار ضئيل فقط أو ممنوعة من الحركة تماماً، تكون قوة الدفع الأفقية من قبل التربة:

$$P = \frac{1}{2}\gamma H^2 K_A$$

ذلك لأن التماسك سيفقَد من خلال الجريان اللدن.

Water Pressure ضغط الماء

تساوي قوة الدفع الأفقية الإجمالية، المطبقة من قبل الماء المحتجزة خلف جدار، إلى:

$$P = \frac{1}{2}\gamma_o H^2$$

حيث؛

H = ارتفاع الماء فوق قاعدة الجدار، ft (m).

γ_o = وزن واحدة الحجم للماء، lb/ft^3 (Kg/m^3)، وتساوي إلى $62.4\ lb/ft^3$ ($1001\ Kg/m^3$) من أجل الماء العذب و$64\ lb/ft^3$ ($1026.7\ Kg/m^3$) من أجل الماء المالح.

تكون قوة الدفع الأفقية مطبقة عند منسوب يساوي $\frac{H}{3}$ فوق قاعدة الجدار ويكون الضغط موزّعاً مثلثياً وبضغط أعظمي يساوي $\frac{2P}{H}$ يحدث عند أسفل الجدار.

وبغض النظر عن انحدار سطح الأرض خلف الجدار، يكون الدفع الجانبي من قبل الماء أفقياً دائماً.

الضغط الجانبي الناتج عن التحميل الإضافي
Lateral Pressure From Surcharge

إن تأثير الحمل الإضافي على جدار يحجز خلفه تربة غير متماسكة أو تربة متماسكة غير مشبعة يمكن أن يوضح عن طريق تطبيق حمولة أفقية منتظمة ذات مقدار K_Ap ممتدة على ارتفاع الجدار، حيث p هي الحمولة الإضافية مقدرة بـ $pound/ft^2$ (Kilopascal). ويجب أن تُعتبر القيمة الكلية للحمولة الإضافية p، في حالة الترب المتماسكة والمشبعة، وكأنها فاعلة على امتداد ارتفاع الجدار وكحمولة أفقية منتظمة. و K_A تمّ تعريفها سابقاً.

استقرارية المنحدرات Stability Of Slopes

الترب اللامتماسكة

يكون المنحدر، في الترب اللامتماسكة التي لا تنــزح أو لا ترشح الماء منها، مستقراً إذا كان:

$$i < \phi$$

أما في حالة رشح المياه بصورة موازية للمنحدر وبافتراض أن التربة مشبعة، يكون المنحدر اللانهائي (الممتد بعيداً) في التربة اللامتماسكة مستقراً إذا كان:

$$\tan i < \left(\frac{\gamma_b}{\gamma_{sat}}\right)\tan\phi$$

حيث:

i = زاوية انحدار أو ميل سطح الأرض.

ϕ = زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة.

γ_b، γ_{sat} = أوزان واحدات الحجم، lb/ft^3 (Kg/m^3).

الترب المتماسكة

يكون المنحدر في الترب المتماسكة مستقراً إذا كان:

$$H < \frac{C}{\gamma N}$$

حيث:

H = ارتفاع المنحدر، ft (m)

C = التماسك، lb/ft^2 (Kg/m^2)

γ = وزن واحدة الحجم، lb/ft^3 (Kg/m^3)

N = رقم الاستقرار، بدون بعد.

ويساوي الرقم N من أجل الانهيار الذاتي للمنحدر، وبدون رشح للماء، إلى:

$$N = (\cos i)^2 (\tan i - \tan \phi)$$

ويساوي رقم الاستقرار N في حالة رشح الماء، إلى:

$$N = (\cos i)^2 \left[\tan i - \left(\frac{\gamma_b}{\gamma_{sat}} \right) \tan \phi \right]$$

عندما يكون المنحدر مغموراً بالماء، فإن φ هي زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة وγ تساوي إلى γ_b. وفي حال تمت إزالة الماء من المنحدر المغمور بها في فترة زمنية قصيرة (تخفيض مفاجئ لمنسوب الماء)، تكون الزاوية φ هي زاوية الاحتكاك الداخلي المُثقّلة المساوية إلى $\phi\ (\gamma_b/\gamma_{sat})$، وتكون γ مساوية إلى γ_{sat}.

Bearing Capacity Of Soils قدرة تحمُل (السعة الحملية) الترب

تُعطى قدرة التحمل الحدّية التقريبية تحت أساس طويل عند سطح التربة بعلاقة براندل Prandtl وفق:

$$q_u = \left(\frac{c}{\tan\phi}\right) + \frac{1}{2}\gamma_{dry} b\sqrt{K_p}\,(K_p e^{\pi \tan\phi} - 1)$$

حيث:

q_u = قدرة التحمل الحدية للتربة، lb/ft^2 (Kg/m^2).

c = التماسك، lb/ft^2 (Kg/m^2).

ϕ = زاوية الاحتكاك الداخلي، بالدرجات.

γ_{dry} = وزن واحدة الحجم الجاف للتربة، lb/ft^3 (Kg/m^3).

b = عرض الأساس، ft (m).

d = عمق الأساس تحت سطح التربة، ft (m).

K_p = أمثال الضغط العكسي (اللافعّال) ويساوي:

$$K_p = \left[\tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)\right]^2$$

e = العدد الطبيعي (النيبري) = 2.71828

يمكن أن يتم تعديل السعة الحملية الحدية للتربة، بما يخص الأساسات تحت سطح التربة، بالعامل $1 + Cd/b$. ويساوي العامل C تقريباً إلى 2 بالنسبة للترب اللامتماسكة، وتقريباً إلى 0.3 للترب المتماسكة. وقد جرت العادة بحذف التزايد الحاصل في قدرة تحمل التربة مع ازدياد العمق في الترب المتماسكة.

مقدار الهبوط (الغوص) أسفل الأساس

Settlement Under Foundations

تُعطى العلاقة التقريبية بين الحمولات المطبقة على الأساسات ومقدار الهبوط بـــ:

$$\frac{q}{P} = C_1\left(1 + \frac{2d}{b}\right) + \frac{C_2}{b}$$

حيث:

q = شدة الحمولة، lb/ft^2 (Kg/m^2).

P = الهبوط، in (mm).

d = عمق الأساس تحت سطح الأرض، ft (m).

b = عرض الأساس، ft (m).

C_1 = عامل عددي يعتمد على الاحتكاك الداخلي.

C_2 = عامل عددي يعتمد على التماسك.

يتم تحديد العاملين C_1 وC_2 عادةً عن طريق تجارب تحميل صفيحة التحمّل.

Soil Compaction Tests تجارب رص التربة

تُستخدم طريقة المخروط الرملي في الحقل لتعيين كثافة رص الترب في السدود الترابية وردميات الطرق وفي الردميات الإنشائية، هذا بالإضافة إلى تعيين كثافة الترسّبات الطبيعية للتربة والتدرجات الحبيّة والخلطات الترابية أو بعض المواد المشابهة الأخرى. وتكون هذه الطريقة (المخروط الرملي) غير ملائمة في واقع الحال بالنسبة للترب المشبعة أو الطريّة أو الهشة (تتفتت بسهولة).

تُحسب المواصفات المُميّزة للتربة من:

$$\text{حجم التربة، مقدراً بـ } ft^3(m^3) = \frac{\text{وزن الرمل الذي يملأ الحفرة، } lb(kg)}{\text{كثافة الرمل، } lb/ft^3\ (kg/m^3)}$$

$$\text{الرطوبة \%} = \frac{100\ (\text{وزن التربة الرطبة} - \text{وزن التربة الجافة})}{\text{وزن التربة الجافة}}$$

$$\text{الكثافة الحقلية مقدرة بـ}\ lb/ft^3\ (kg/m^3) = \frac{\text{وزن التربة، } lb\ (kg)}{\text{حجم التربة، } ft^3\ (m^3)}$$

$$\text{الكثافة الجافة} = \frac{\text{الكثافة الحقلية}}{1 + \frac{\text{الرطوبة \%}}{100}}$$

$$\text{الرص \%} = \frac{100\ (\text{الكثافة الجافة})}{\text{الكثافة الجافة القصوى}}$$

يتم إيجاد الكثافة الجافة القصوى بوضع مخطط لمنحني الكثافة - الرطوبة.

تجربة التحميل (للصفيحة)

إحدى الطرق المبكرة في حساب قيمة قابلية التشوّه الحقلية للترب الحبية الخشنة هي تجربة التحميل (للصفيحة) ذات المقياس المُصغَّر. حيث استخدمت البيانات المطوّرة عن هذه التجارب ليعطي عامل المقياس إمكانية التعبير عن الهبوط ρ لأساس بالقياس الطبيعي الكامل من خلال الهبوط ρ_1 لصفيحة مساحتها 1 قدم^2 ($0.0929\ m^2$).

ويعطى هذا العامل كتابع للعرض B العائد لصفيحة تحميل بالحجم الطبيعي وفق:

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \left(\frac{2B}{1+B}\right)^2$$

ومن خلال الحل المرن لنصف الفضاء*، يمكن أن يُعبّر عن E'_s من خلال نتائج تجربة تحميل الصفيحة باستخدام نسبة ضغط التحميل على هبوط الصفيحة k_v وفق العلاقة:

$$E'_s = \frac{k_v(1-\mu^2)\pi/4}{4B/(1+B)^2}$$

حيث تمثل μ أمثال بواسون، وتُعتبر عادةً ضمن مجال 0.30 إلى 0.40.

تَفْتَرِضُ معادلة E'_s أنّ ρ_1 مشتقة من التجربة على صفيحة صلبة بقطر دائري 1 ft (0.3048 m) وأنّ B هو القطر المكافئ لمساحة تحميل الأساس بالقياس الطبيعي الكامل. قد تحمل الصياغات الحقلية (العلاقات المستنتجة عن التجارب الحقلية) خطأً لا يستهان به بسبب المجال المحدود لقياس الأساس المستخدم والتبعثر الكبير لقاعدة البيانات. إضافةً لذلك، عدم إعارة الانتباه للتغيرات في الصفات المميزة للترب المحملة وتاريخ إجهادها.

نسبة التحميل الكاليفورنية

تستخدم نسبة التحميل الكاليفورنية (CBR) في معظم الأحيان كقياس لنوعية مقاومة التربة التي تدعم طبقة الرصف بهدف تعيين ثخانة طبقة الرصف وأساسها وكذا ثخانة الطبقات الأخرى.

$$CBR = \frac{F}{F_0}$$

حيث: F = القوة بواحدة المساحة، المطلوبة لاختراق كتلة ترابية بقضيب اسطواني ذي مقطع دائري مساحته $3\ in^2$ ($1935.6\ mm^2$) (تقريباً بقطر 2 in (50.8 mm)) بمعدّل 0.05 in/min (1.27 mm/min).

F_0 = القوة بواحدة المساحة، المطلوبة للاختراق المقابل في مادة نموذجية (قياسيّة).

* باعتبار أن التربة ممتدة إلى ما لا نهاية. (المعدّ)

تُعيّن النسبة، بطريقة نموذجية، عند الاختراق 0.10 in (2.54 mm)، بالرغم من استخدام قيم اختراقات أخرى في بعض الأحيان. وطبقة الأساس الممتازة هي الطبقة التي تمتلك نسبة تحميل (CBR) % 100، وقد يكون للتربة المرصوصة نسبة تحميل (CBR) تعادل % 50، بينما قد يكون للتربة الضعيفة نسبة تحميل (CBR) تعادل % 10.

نفاذية التربة

إن عامل النفاذية k هو قياس معدّل جريان الماء من خلال تربة مشبعة واقعة تحت تأثير تدرّج هيدروليكي مُعطى i، cm/cm، ويكون معرّفاً وفق قانون دارسي (Darcy) كما يلي:

$$V = K\,i\,A$$

حيث:

V = معدّل الجريان، Cm^3/s.

A = مساحة المقطع العرضي للتربة التي ينفذ فيها الجريان، cm^2.

يعتمد العامل k على توزّع الحجم الحبي ونسبة الفراغ وبنية التربة، فهو قد يتغيّر، بطريقة نموذجية، من جريان يتجاوز 10 cm/s بالنسبة للحصى الخشنة إلى أقل من 10^{-7} cm/s بالنسبة للترب الغضارية. أما في ترب الطمي النموذجية، فيكون k في الجريان الأفقي أكبر من k في الجريان الشاقولي، المتأثر بترتيب توضّع كتل الطمي على الأغلب.

معدّات الرص Compaction Equipment

هنالك تنوع "كبير" في الآليات المستخدمة للحصول على الرص المطلوب في الحقل.

فتستخدم مداحل أرجل الغنم (sheepsfoot) عموماً في الترب التي تتضمن نسب مرتفعة من الغضار. وتستخدم المداحل الرجاجة في الترب الأكثر خشونة.

لكي نستطيع أن نحدّد العمق الأعظمي للطبقة المرصوصة، نقوم بتجربة ملء الحفرة. وأثناء إجراء التجربة نستطيع أن نحدّد أيضاً الآلة الأكثر ملاءمة والضغط الواجب تطبيقه، مقدراً بـــ lb/in^2 (KPa)، على سطح تماس التربة. فآلة الرص المختارة يجب أن تكون قادرة على إعطاء الرص المطلوب بأربع مرات إلى ثمان مرات من أشواط المرور. كما ويمكن تعيين سرعة الدحل المطلوبة أيضاً. فالسرع المتوسطة، مقدرة بـــ mi/h (km/h)، ضمن الشروط العادية قد أُعطيت في الجدول 8.3.

يمكن أن يُحسب ناتج الرص (الإنتاجية) من:

$$yd^3/h(m^3/h) = \frac{16WSLFE}{P}$$ (حجم الياردات المكعبة المرصوصة بالساعة)

حيث:

W = عرض دولاب الدحل، ft (m).

S = سرعة دورات الدحل، mi/h (Km/h).

L = ثخانة الطبقة المرصوصة، in (mm).

F = نسبة حجم yd^3 (m^3) بعد الرص إلى حجم yd^3 (m^3) غير مرصوص (أي أن هذه النسبة أصغر من الواحد دائماً).

E = عامل المردود أو الكفاءة (يأخذ بعين الاعتبار الضياعات الزمنية، مثل تلك الضياعات الناتجة عن دورانات أو التفافات المدحلة)؛ 0.90 ممتاز، 0.80 متوسط، 0.75 ضعيف.

P = عدد مرات المرور.

الجدول 8.3 متوسط سرع المداحل

(km/h)	mi/h	Type
(19.3)	12	Grid rollers
(4.8)	3	Sheepsfoot rollers
(16.1)	10	Tamping rollers
(12.8)	8	Pneumatic rollers

صيغ ممانعة التربة للحركة Formulas For Earthmoving

تُبدي القوى الخارجية مقاومة (ممانعة) لحركة دوران دواليب العربات. مثل الجرارات (Tractors) والسكريبرات. ويكون على المحرِّك أن يقدم الطاقة للتغلب على هذه الممانعة؛ ومع تزايد الممانعة تزداد الطاقة المطلوبة لتحريك الحمولة.

تعتمد مقاومة (ممانعة) دوران الدواليب على الوزن المطبق على الإطارات وكذا على مقدار غوص (اختراق) الإطار المطاطي في الأرض:

$$R = R_f W + R_p p W \qquad (8.6)$$

حيث:

R = ممانعة أو مقاومة دوران العجلة، lb (N).

R_f = عامل ممانعة دوران العجلة، lb/ton (N/tonne)*.

W = الوزن المطبق على العجلات، ton (tonne).

R_p = عامل اختراق الإطار، lb/ton.in (N/tonne.mm).

p = مقدار اختراق الإطار، in (mm).

* ton يعني الطن الإنكليزي ويساوي إلى 2240 باوند، ويساوي إلى 2000 باوند في أميريكا، أما tonne فهو الطن المتري ويساوي إلى 1000 كغ. ويكتب في معظم الأحيان ton. (المعدّ).

تؤخذ R_f عادةً مساويةً لـــ 40 lb/ton (أو 2 % lb/lb) (1173 N/t) وتؤخذ R_p مساوية لـــ 30 lb/ton.in (أو 1.5 % lb/lb.in) (3288 N/t.mm).

وبالتالي يمكن أن تكتب المعادلة (8.6) وفق ما يلي:

$$R = (2\ \% + 1.5\ \%\ p)\ W' = R'\ W' \qquad (8.7)$$

حيث:

W' = الوزن المطبق على العجلات، lb (N).

R' = 2 % + 1.5 % p.

ثمة حاجة إلى تطبيق طاقة إضافية للتغلب على ممانعة دوران العجلات أثناء سير العربات في المنحدرات، وتكون ممانعة الانحدار متناسبة أيضاً مع الوزن:

$$G = R_g\ s W \qquad (8.8)$$

حيث:

G = ممانعة الانحدار، lb (N).

R_g = عامل ممانعة الانحدار = 20 lb/ton (86.3 N/t) ويساوي

= 1 % lb/lb (N/N)

s = الانحدار بنسبة مئوية، موجب في الحركة الصاعدة وسالب في الحركة الهابطة.

وهكذا، تساوي ممانعة الطريق الإجمالية إلى المجموع الجبري لمقاومتي أو ممانعتي الدوران والانحدار، أو أن السحب أو الجر الإجمالي المطلوب، مقدراً بـــ lb (N) يساوي إلى:

$$T = (R' + R_g\ s)\ W' = (2\ \% + 1.5\ \%\ p + 1\ \%\ s)\ W' \qquad (8.9)$$

عدا عن ذلك، من المفترض أن يُطبَّق تسامح لفقدان الطاقة مع الارتفاع (بسبب نقص الأوكسجين الذي يؤدي إلى احتراق غير كامل). فإن تمّ ذلك، فيسمح

بفقدان نسبة 3 % من قوة الجر لكل 1000 ft (305 m) بعد تجاوز الارتفاع (762 m) 2500 ft.

تعتمدK قيمة قوة الجر P المستخدمةK على الوزن المطبق W على العربات:

$$P = f\,W \qquad (8.10)$$

حيث: f = عامل الجر.

حساب كميات التربة المشحونة

عندما يتم حفر التربة فإنها تتزايد بالحجم أو أنها تنفش، بسبب تزايد الفراغات:

$$V_b = V_L L = \frac{100}{100 + \%\text{النفش}} V_L \qquad (8.11)$$

حيث:

V_b = الحجم الأصلي، yd^3 (m^3)، أو بالياردات الطبيعية المكعبة (bank yards*)

V_L = الحجم المحمول، yd^3 (m^3)، أو بالياردات السائبة (الناتجة عن الحفر) المكعبة (loose yards).

L = عامل الحمولة.

وعندما يتم رص التربة فإنها تتناقص بالحجم:

$$V_c = V_b S \qquad (8.12)$$

حيث:

V_c = الحجم المرصوص، yd^3 (m^3).

S = عامل الانكماش.

---

* من الآن فصاعداً سنترجم التعبير bank yards بياردات البانك المكعبة وهو عبارة عن حجم الياردات في مكانها الطبيعي أو في وضعها الطبيعي (بدون نفش). (المعدّ)

إن حجم ياردات البانك (غرفة الاستعارة) المنقولة بواحدة كمية الشحن تساوي إلى وزن الحمولة، المقدرة بـــ lb (Kg)، مقسومة على كثافة المادة في مكان الحفر، مقدرة بـــ lb (kg) على يارد بانك (m^3).

Scraper Production إنتاجية السكريبر

تُقاس الإنتاجية باستخدام ياردات البانك المكعبة (أو أمتار مكعبة) للمادة التي تحفرها الآلة وتُفرِّغها في ساعة واحدة، وذلك ضمن شروط المهمة المفروضة. وتعطى وفق:

الإنتاجية، bank yd^3/h (m^3/h) = الحمولة، yd^3 (m^3) × عدد الرحلات بالساعة.

$$\text{عدد الرحلات بالساعة} = \frac{\text{زمن التشغيل (العمل)، min/h}}{\text{زمن الدورة، min}}$$

يمكن أن يتم تحديد الحمولة (الشحنة) أو كمية المادة التي تحملها الآلة عن طريق وزن أو تقدير الحجم، فتقدير حجم الحمولة أو الشحنة بالحالة الطبيعية يتضمن تعيين ياردات البانك المكعبة (أمتار مكعبة) المعدّة للشحن، في حين أن المادة المحفورة تتمدد عندما تُحمَّل في الآلة. فلتعيين ياردات البانك المكعبة (الأمتار المكعبة) من الحجم السائب (المنفوش بعد الحفر)، لابد أن يكون مقدار النفش أو عامل الحمولة معروفاً.

في الحقيقة، طريقة قياس الوزن هي من أكثر الطرق دقة في تعيين الحمولة الفعلية.

ويتم هذا بصورة طبيعية عن طريق أخذ وزن إحدى العجلات أو المحاور فرادى (كلاً على حدة) بموازين متنقلة (محمولة)، ثم يتم جمع أوزان العجلات أو المحاور ويُطرح منها الوزن الفارغ. وللتقليل من الخطأ المرتكب، يجب أن تكون الآلة مستوية نسبياً. كما يجب أن يتم وزن عدد كاف من الحمولات للحصول على معدّل متوسط جيد:

$$\text{Bank yd}^3 = \frac{\text{(kg)lb وزن الشحنة (الحمولة)،}}{\text{(kg/m}^3\text{)lb/bankyd}^3\text{ كثافة المادة،}}$$

الآليات المطلوبة

لتحديد عدد السكريبرات (Scrapers) المطلوبة للمهمة، لابد أن تُحسب الإنتاجية المطلوبة أولاً:

$$\text{الإنتاجية المطلوبة، (m}^3\text{/h) yd}^3\text{/h} = \frac{\text{الكمية، (m}^3\text{)bank yd}^3}{\text{زمن التشغيل (العمل)، h}}$$

$$\text{عدد السكريبرات المطلوبة} = \frac{\text{الإنتاجية المطلوبة، (m}^3\text{/h) yd}^3\text{/h}}{\text{الإنتاجية بواحدة القياس، (m}^3\text{/h) yd}^3\text{/h}}$$

$$\text{عدد السكريبرات التي يستطيع الدافع (آلة الجر) أن يسحبها} = \frac{\text{الدورة الزمنية للسكريبر، min}}{\text{الدورة الزمنية للدافع، min}}$$

ولأن السرع والمسافات تتغير في الذهاب (بالحمولة) والإياب (بدون حمولة)، فيتم تقدير أزمنة الذهاب والإياب على نحوٍ مستقل.

$$\text{تغيّر الزمن، min} = \frac{\text{مسافة الذهاب، ft}}{88 \times \text{السرعة، mi/h}} + \frac{\text{مسافة الإياب، ft}}{88 \times \text{السرعة، mi/h}}$$

$$= \frac{\text{مسافة الذهاب، m}}{16.7 \times \text{السرعة، km/h}} + \frac{\text{مسافة الإياب، m}}{16.7 \times \text{السرعة، km/h}}$$

يمكن الحصول على سرعة الذهاب (بالحمولة) من خلال نشرة مواصفات الآلة عندما تكون قيمة قوة قضيب الجر المطلوبة معروفة.

التحكم بالاهتزازات الناتجة عن عملية النسف (التفجير)

Vibration Control In Blasting

لابد لمستخدمي المتفجرات أن يكونوا فاعلين في تخفيض الاهتزازات والضجيج الناتجة عن عمليات النسف إلى أدنى مستوى وحماية أنفسهم من الادعاءات الموجهة ضدهم.

يزداد انتشار الاهتزازات الناتجة عن عملية النسف مع السرعة V، ft/s (m/s)، والتردد f، Hz، وطول الموجة L، ft (m)، التي ترتبط مع بعضها بالعلاقة:

$$L = \frac{V}{f}$$

سرعة الجزيئات v، in/s (mm/s)، المضطربة بوساطة الاهتزازات، تعتمد على سعة الاهتزازات A، in (mm):

$$v = 2 \pi f A$$

فإذا كانت السرعة v_1 على مسافة D_1 من الانفجار معلومة، فإن السرعة v_2 على مسافة D_2 من الانفجار يمكن أن يتم تقديرها من:

$$v_2 \approx v_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{1.5}$$

يُعطى تسارع الجزيئات a، in/s^2 (mm/s^2)، بالعلاقة:

$$a = 4 \pi^2 f^2 A$$

بما يخص شحنة تنفجر على سطح الأرض، يمكن أن يُحسب الضغط الزائد P، lb/in^2 (KPa)، من العلاقة:

$$P = 226.62\left(\frac{W^{1/3}}{D}\right)^{1.407}$$

حيث:

W = الوزن الأعظمي للمواد المتفجرة مقدراً بـ lb (kg) بالإعاقة* (Per delay)

D = المسافة، ft (m)، من مكان الانفجار إلى المكان المعرض لضغط الانفجار.

يمكن أن يُحسب مستوى ضغط الصوت، ديسيبل (decibels)، من العلاقة:

$$dB = \left(\frac{P}{6.95\times10^{-28}}\right)^{0.084}$$

ولكي يتم التحكم بالاهتزازات، يجب أن تتم إدارة عملية النسف بمساعدة صيغة المسافة القياسية (العيارية):

$$v = H\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-\beta}$$

حيث:

β = ثابت (يتغيّر بتغيُّر الموقع).

H = ثابت (يتغير بتغيُّر الموقع).

تُعرَف المسافة إلى المكان المتعرض لاهتزازات الانفجار، ft (m)، المقسومة على الجذر التربيعي لكمية الباوندات (kg) العظمى بالإعاقة، بالمسافة العيارية.

* المقصود بهذا التعبير أنه يوجد في كل مكان إعاقة معينة للاهتزازات تتغير بتغير المكان. ولكن يجب ألا تزيد كمية المتفجرات عن حد معين بحيث لا يمكن الاستفادة من الإعاقة.

لقد قُبِلتْ وأُقرَّتْ في معظم قاعات المحاكم حقيقة أن سرعة الجزيئة التي لا تتجاوز 2 in/s (50.8 mm/s) لا تسبب أي ضرر يذكر في أي منشأ.

ويتضمن هذا، بما يخص السرعة، أن ضرر الاهتزاز يكون مستبعداً على مسافات عيارية تتجاوز 8.

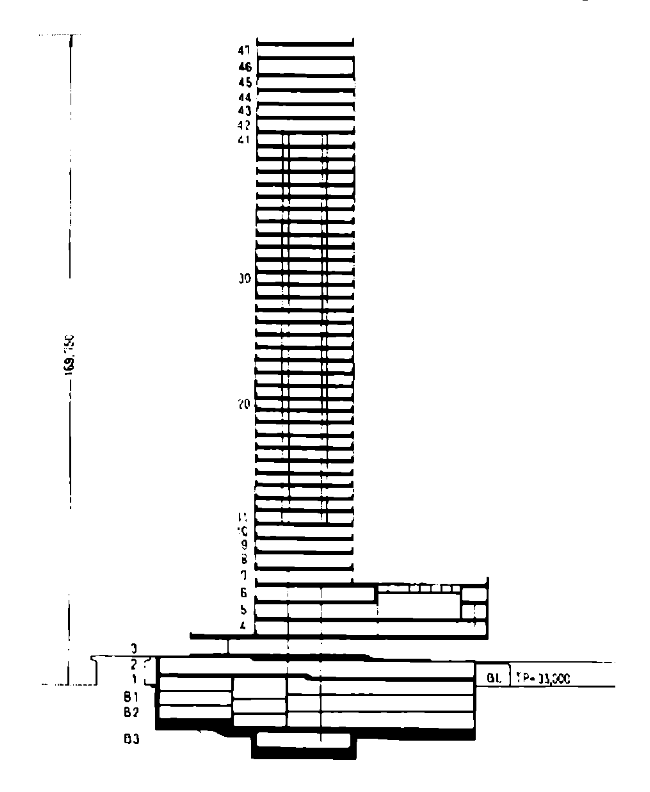
9

تصميم عناصر الأبنية والمنشآت العامة

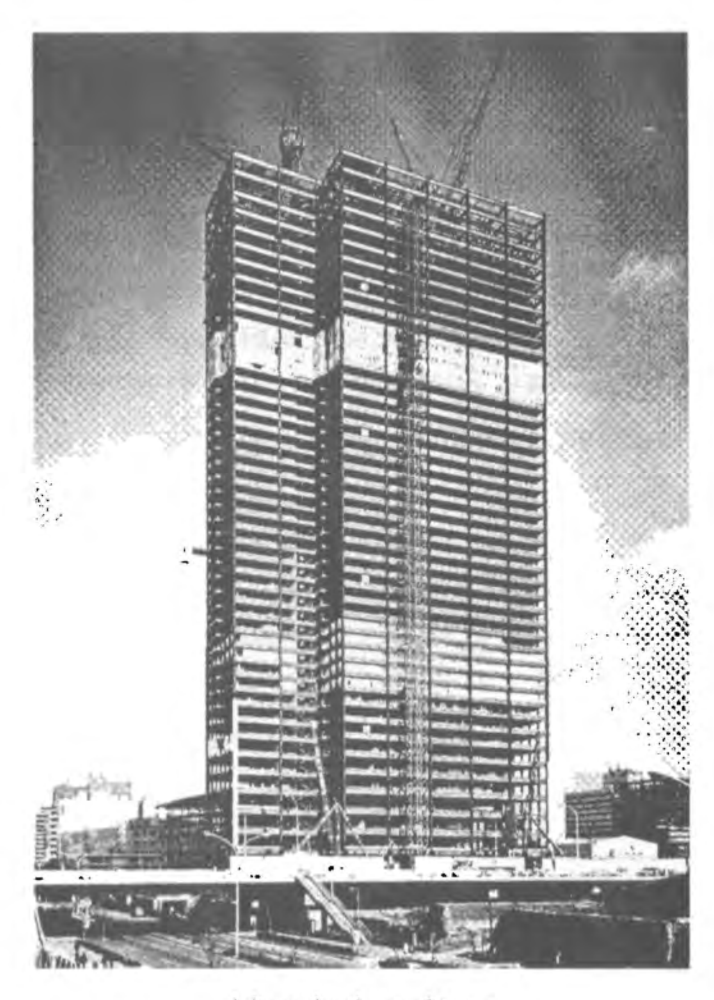
Building And Structures Formulas

قبل الشروع في دراسة هذا الفصل، يفترض بالمهندس الدارس أن يكون مطلعاً على المنشآت المختلطة وكيفية تصميم وتقوية وتثبيت عناصرها الإنشائية.ويستخدم الإنشاء المختلط عادةً في الأبنية الضخمة (ناطحات السحاب) والمنشآت الاستراتيجية الهامة التي عليها أن تواجه حمولات اهتزازي (رياح، زلازل، هبوط وإقلاع طائرة عمودية، ... الخ).

نماذج من مباني متعددة الطوابق



مخطط تمثيلي لمبنى مؤلف من 47 طابقاً وبارتفاع إجمالي 169.75m



صورة لمبنى إنشاء مختلط

عامل تصميم الحمولة والمقاومة الخاص بإجهاد القص المؤثر في عناصر المباني

Load-And-Resistance Factor Design For Shear In Buildings

يمكن حساب السعة القصية (قدرة المقاومة على القص) V_u، مقدرة بـــ Kip ‎(KN = 4.448x Kip)، للعناصر المرونية، وذلك بالاعتماد على مواصفات المعهد الأميريكي لفولاذ الإنشاء (AISC) الخاصة بعامل تصميم الحمولة والمقاومة (LRFD) للأبنية، من العلاقات التالية:

$$\frac{h}{t_w} \leq \alpha \quad \text{عندما} \quad V_u = 0.54\, F_{yw}\, A_w$$

$$\alpha < \frac{h}{t_w} < 1.25\alpha \quad \text{عندما} \quad V_u = \frac{0.54\alpha F_{yw} A_w}{h/t_w}$$

$$\frac{h}{t_w} > 1.25\alpha \quad \text{عندما} \quad V_u = \frac{23{,}760 k A_w}{(h/t_w)^2}$$

حيث

F_{yw} = إجهاد الخضوع المُميِّز الأصغري للجسد، Ksi ‏(MPa = 6.894 × Ksi).

A_w = مساحة الجسد، in^2 ‏(mm^2) = dt_w

$$\alpha = 187\sqrt{k / F_{xw}}$$

k = 5 إذا كانت a/h تتجاوز 3.0 أو $67{,}600/(h/t_w)^2$، أو إذا لم تكن قطع التقوية مطلوبة.

وإلا فإن $k = 5 + \frac{5}{(a/h)^2}$

وتكون قطع التقوية مطلوبة عندما يتجاوز القص قيمة V_u. قد لا تتجاوز النسبة h/t_w في الجيزان العرضية اللامقواة القيمة 260. أما في الجيزان العرضية المزوّدة بقطع

تقوية فإن قيمة h/t_w المسموحة الأعظمية تساوي $2{,}000\sqrt{F_{yf}}$ من أجل $a/h \le 1.5$
أو تساوي $14{,}000/\sqrt{F_{yf}\,(F_{yf}+16.5)}$ من أجل $a/h > 1.5$.

حيث: F_{yf} إجهاد الخضوع المميز الأصغري للجناح، مقدراً بـ Ksi.

بما يخص السعة القصية (قدرة مقاومة القص) ضمن مجال فعل الشد، يمكن العودة إلى مواصفات الـ AISC الخاصة بعامل تصميم الحمولة والمقاومة (LRFD).

إجهاد التصميم المقبول* في أعمدة الأبنية

Allowable-Stress Design For Building Columns

تُعطي مواصفات الـ AISC الخاصة بإجهاد التصميم المقبول (ASD) للأبنية صيغتين لحساب إجهاد الضغط المقبول F_a في العناصر الرئيسية، Ksi (MPa). وتعتمد الصيغة المستخدمة على علاقة أمثال النحافة الأكبر الفعّال Kl/r، للمقطع العرضي لأي قطعة غير مقواة، مع العامل C_c المُعرَّف بالمعادلة التالية والجدول 9.1:

الجدول 9.1 قيم C_c

F_y	C_c
36	126.1
50	107.0

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} = \frac{756.6}{\sqrt{F_y}}$$

حيث:

E = معامل مرونة الفولاذ ويساوي:

* أو إجهاد التصميم المسموح. (المعدّ).

- = 29,000 Ksi (128.99 GPa).

F_y = إجهاد خضوع الفولاذ، Ksi (MPa).

وعندما تكون Kl/r أقل من C_c فإن:

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2}\right]F_y}{F.S.}$$

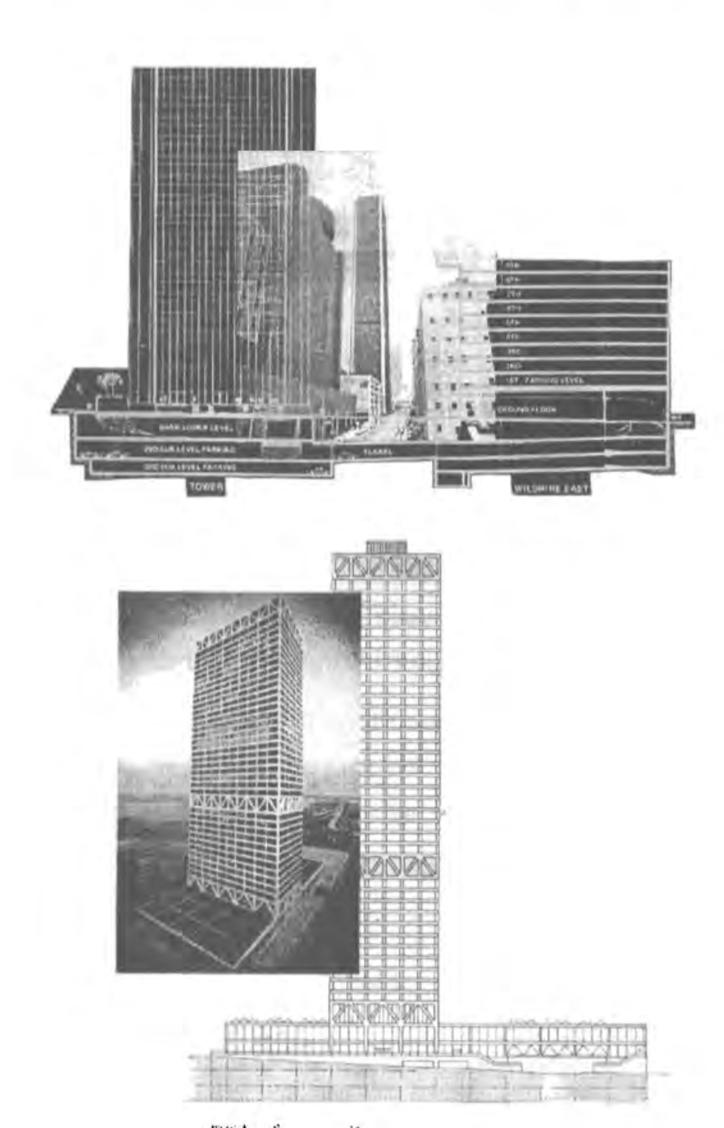
حيث:

$$F.S. = \text{عامل الأمان} = \frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}$$ (تقرأ من اليمين إلى اليسار)

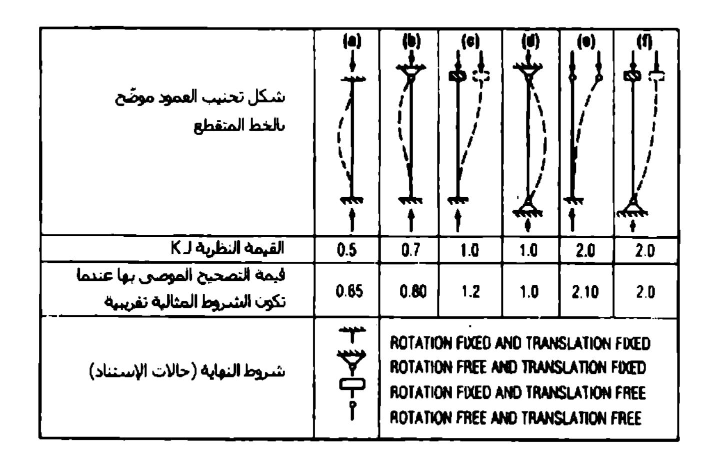
وعندما تتجاوز Kl/r قيمة C_c فإن:

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(Kl/r)^2} = \frac{150{,}000}{(Kl/r)^2}$$

قد يكون عامل الطول الفعّال K، المساوي إلى نسبة طول العمود الفعال إلى الطول الفعلي اللامقوى، أكبر أو أقل من 1.0. والقيم النظرية لـــ K العائدة لستة شروط مثالية، التي يكون فيها دوران وانتقال المفصل مُحققاً تماماً أو غير موجود، تم سردها في الشكل 9.1.



معظم هذه المباني ذات إنشاء مختلط



شكل تحنيب العمود موضّح بالخط المتقطع	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
القيمة النظرية لـ K	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
قيمة التصحيح الموصى بها عندما تكون الشروط المثالية تقريبية	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
شروط النهاية (حالات الإسناد)	ROTATION FIXED AND TRANSLATION FIXED ROTATION FREE AND TRANSLATION FIXED ROTATION FIXED AND TRANSLATION FREE ROTATION FREE AND TRANSLATION FREE					

الشكل 9.1 قيم عامل الطول الفعّال K الخاص بالأعمدة.

عامل تصميم الحمولة والمقاومة لأعمدة الأبنية
Load-And-Resistance Factor Design For Building Columns

يتم قبول التحليل اللدن للعناصر الموشورية المضغوطة في الأبنية في حال لم تتجاوز $\sqrt{F_y}(l/r)$ الـ 800 وكانت F_u ≥ 65 Ksi أو (448 MPa). ويمكن حساب الحمولة القصوى Pu، في العناصر المحملة محورياً مع الشرط $\lambda_e \geq b/t$، من العلاقة:

$$P_u = 0.85\ A_g\ F_{cr}$$

حيث:

A_g = مساحة المقطع الخامي (الإجمالي) للعنصر.

F_{cr} = $0.6582\ F_y$ من أجل $\lambda \leq 2.25$

= $0.877\ F_y/\lambda$ من أجل $\lambda > 2.25$

$$\lambda = \left(\frac{F_y}{286{,}220}\right)\left(\frac{Kl}{r}\right)^2$$

تَعرضُ مواصفات الـــ AISC الخاصة بعامل تصميم الحمولة والمقاومة (LRFD) الصيغ العائدة لتصميم الأعضاء المزودة بعناصر النحافة.

إجهاد التصميم المقبول في جيزان الأبنية

Allowable-Stress Design For Building Beams

إجهاد الليف الأعظمي في حالة الانعطاف في الجيزان والجيزان الرئيسية المستندة أفقياً هو $F_b = 0.66\ F_y$ وذلك إذا كانت هذه الجيزان ذات مقاطع مرصوصة، باستثناء الجيزان الرئيسية المختلطة والأعضاء بنقاط خضوع تتجاوز (448.1 MPa) 65 Ksi. أما في مقاطع الجيزان اللامرصوصة فإن $F_b = 0.60\ F_y$. و F_y هي مقاومة الخضوع الأصغرية المميزة (النوعية) للفولاذ، Ksi (MPa). يسرد الجدول 9.2 قيم F_b من أجل صنفين من الفولاذ.

الجدول 9.2 إجهادات الانعطاف المقبولة في الجيزان غير المقواة في الأبنية.

مقاومة الخضوع . Ksi (MPa)	مقاطع مرصوصة $0.66\ F_y$ (MPa)	مقاطع غير مرصوصة $0.60\ F_y$ (MPa)
36 (248.2)	24 (165.5)	22 (151.7)
50 (344.7)	33 (227.5)	30 (206.8)

يُطبق إجهاد الليف الأبعد المقَبول المساوي لـــ $0.60\ F_y$ على الأعضاء المستندة أفقياً وكذا اللاتناظرية، باستثناء الأعضاء ذات المقاطع التي على شكل أقنية والمقاطع الصندوقية اللامرصوصة. ويجب ألا يتجاوز الضغط على السطوح الخارجية للأقنية التي تنحني حول محورها الرئيسي القيمة $0.60\ F_y$ أو القيمة المعطاة بالمعادلة (9.5). (والتي سترد بعد قليل).

يجب أن يتم تخفيض الإجهاد المقبول $0.66\ F_y$، العائد للأعضاء المرصوصة، إلى $0.60\ F_y$ عندما يكون جناح الضغط غير مسنود حتى طول، مقدراً بـ in (mm)، يتجاوز أصغر الطولين:

$$l_{max} = \frac{76.0 b_f}{\sqrt{F_y}} \quad (9.1)$$

$$l_{max} = \frac{20.000}{F_y d / A_f} \quad (9.2)$$

حيث:

b_f = عرض جناح الضغط، in (mm).

d = عمق (تدلي) الجائز، in (mm).

A_f = مساحة جناح الضغط، in^2 (mm^2).

ويجب أن يتم تخفيض الإجهاد المقبول إلى أقصى حد وذلك عندما تتجاوز النسبة l/r_T حدوداً معينة، حيث l هو الطول اللامقوى، in (mm)، لجناح الضغط، وr_T هو نصف قطر العطالة، in (mm)، للجزء من الجائز المؤلف من جناح الضغط وثلث الجسد المعرّض للضغط.

فمن أجل:

$$\sqrt{102{,}000 C_b / F_y} \le l / r_T \le \sqrt{510{,}00 C_b / F_y}$$

استخدم العلاقة:

$$F_b = \left[\frac{2}{3} - \frac{F_y (l / r_T)^2}{1{,}530{,}000 C_b}\right] F_y \quad (9.3)$$

ومن أجل:

$$l/r_T > \sqrt{510{,}000C_b/F_y}$$

استخدم العلاقة:

$$F_b = \frac{170{,}000C_b}{(l/r_T)^2} \quad (9.4)$$

حيث:

C_b = عامل تعديل (مُعدِّل) تدرّج العزم (المعادلة 9.6).

وعلى أي حال، عندما يكون جناح الضغط صلباً وذا مقطع مستطيل تقريباً ومساحته لا تقل عن مساحة جناح الشد، فيمكن أن يؤخذ الإجهاد المقبول وفق ما يلي:

$$F_b = \frac{12{,}000C_b}{ld/A_f} \quad (9.5)$$

وعندما تُطبَّق المعادلة (9.5) (باستثناء تطبيقها على الجيزان التي لها شكل قناة)، فيجب أن تؤخذ F_b وفقاً لأكبر القيم المحسوبة من المعادلات (9.5) و(9.3) أو (9.4)، ولكن بحيث لا تزيد عن $0.60\ F_y$.

يمكن أن يُحسب عامل تدرج العزم C_b الوارد في المعادلات (9.3) إلى (9.5) من العلاقة:

$$C_b = 1.75 + 1.05\frac{M_1}{M_2} + 0.3\left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2 \leq 2.3 \qquad (9.6)$$

حيث:

M_1 = العزم الأصغر في أحد مسنديْ الجائز.

M_2 = العزم الأكبر في المسند الآخر للجائز.

الإشارة الجبرية لـــ M_1/M_2 موجبة في الانعطاف ثنائي الانحناء وسالبة في الانعطاف أحادي الانحناء. وعندما يكون عزم الانعطاف في أي نقطة ضمن الطول اللامقوى أكبر من ذلك الانعطاف عند كلا النهايتين (المسندين)، فعندها يجب أن تؤخذ قيمة C_b مساوية للواحد. ويجب أن تؤخذ قيمة C_b في الإطارات المقواة (الهياكل) مساوية للواحدة من أجل حساب F_{bx} وF_{by}.

المعادلتان (9.4) و(9.5) يمكن أن يتم تبسيطهما بإدخال تسمية جديدة:

$$Q = \frac{(l/r_T)^2 F_y}{510{,}000 C_b} \quad (9.7)$$

الآن، ومن أجل: $0.2 \leq Q \leq 1$ يكون:

$$F_b = \frac{(2 - Q)F_y}{3} \quad (9.8)$$

ومن أجل: $Q > 1$ يكون:

$$F_b = \frac{F_y}{3Q} \quad (9.9)$$

وبالنظر إلى المعادلات السابقة، عندما تطبق المعادلة (9.5) (باستثناء الجيزان ذات المقاطع التي على شكل أقنية)، فإن F_b يجب أن تؤخذ وفقاً لأكبر القيم المعطاة بالمعادلات (9.5) و(9.8) أو (9.9)، إلا أنها يجب ألا تزيد عن $0.60\ F_y$.

عامل تصميم المقاومة والحمولة الخاص بجيزان البناء

Load-And-Resistance Factor Design For Building Beams

يعطى الطول اللامقوى L_p لجناح الضغط والذي قد لا يتجاوز L_{pd} من أجل مقطع مرصوص ينحني حول المحور الرئيسي، وحيث يمكن أن تتشكل المفاصل اللدنة عند الانهيار، يعطى بالمعادلتين اللاحقتين (9.10) و (9.11). أما بما يخص الجيزان التي

تنحني حول المحور الثانوي وكذا الجيزان ذات المقاطع المربعة والدائرية، فإن L_p لا تكون منحسرة في التحليل اللدن.

وبما يخص الجيزان التي مقاطعها على شكل I والمتناظرة حول المحورين الرئيسي والثانوي أو المتناظرة حول المحور الثانوي مع جناح ضغط مساحته أكبر من مساحة جناح الشد، والتي تضم الجيزان الرئيسية المختلطة، فتحمل في مستوي الجسد:

$$L_{pd} = \frac{3600 + 2200(M_1 / M_p)}{F_{yc}} r_y \qquad (9.10)$$

حيث:

F_{yc} = إجهاد الخضوع الأصغري لجناح الضغط، Ksi (MPa)

M_1 = أصغر العزمين عند طرفي (مسندي) الطول اللامقوى للجائز، in.Kip (mm.MPa)

M_p = العزم اللدن، in.Kip (mm.MPa).

r_y = نصف قطر الدوران حول المحور الثانوي، in (mm)

يساوي العزم اللدن M_p إلى $F_y Z$ في المقاطع المتجانسة، حيث:

Z = معامل اللدونة، in^3 (mm^3)، وقد يُحسب في الجيزان الرئيسية المختلطة من أجل توزع لدن على نحو كلي. M_1/M_p موجبة في الجيزان ذات الانحناء السالب (المقلوب).

بما يخص القضبان المستطيلة الصماء والجيزان الصندوقية المتناظرة يكون:

$$L_{pd} = \frac{5000 + 3000(M_1 / M_p)}{F_y} r_y \geq 3000 \frac{r_y}{F_y} \qquad (9.11)$$

يتم تعيين مقاومة التصميم المرونية $0.90\ M_n$ بالحالة الحدّية للتحنيب الفتلي الجانبي (الأفقي)، ويجب أن يتم حسابها من أجل منطقة آخر مفصل يتشكل ومن أجل المناطق غير المجاورة للمفصل اللدن. وتعطي المواصفات صيغ M التي تعتمد على الشكل الهندسي للمقطع والتقوية المزودة لجناح الضغط.

فمثلاً، في المقاطع المرصوصة التي تنحني حول المحور الرئيسي، تعتمد M_n على الأطوال غير المقواة التالية:

L_b = المسافة بين النقاط المقواة ضد الإزاحة الجانبية لجناح الضغط أو المسافة بين النقاط المقواة لمنع الفتل، مقدرة بـ in (mm).

L_p = الطول غير المقوّى جانبياً المُحدَّدُ لسعة الانعطاف اللدنة التامة، ويساوي

$= \frac{300 r_y}{\sqrt{F_{yf}}}$ لمقاطع الجيزان التي على شكل I وكذا الأقنية، ويساوي

$= \frac{3750(r_y / M_p)}{\sqrt{JA}}$ للقضبان (الجيزان النحيلة) التي مقطعها مستطيل أصم وكذا للجيزان الصندوقية.

F_{yf} = إجهاد خضوع الجناح، Ksi (MPa).

J = ثابت الفتل، in^4 (mm^4) (انظر AISC "نشرة فولاذ الإنشاء" حول عامل تصميم الحمولة والمقاومة — LRFD).

A = مساحة المقطع العرضي، in^2 (mm^2)

L_r = الطول الغير مقوّى جانبياً المُحدِّد للتحنيب الجانبي اللامرن، in (mm).

وفي الجيزان I المتناظرة حول المحور الرئيسي أو الثانوي أو المتناظرة حول المحور الثانوي مع مساحة جناح ضغط أكبر من مساحة جناح الشد وكذا في جيزان الأقنية (إ، ـب) المُحمَّلة في مستوي الجسد، يكون:

$$L_r = \frac{r_y X_1}{F_{yw} - F_r}\sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 F_L^2}} \qquad (9.12)$$

حيث:

F_{yw} = إجهاد الخضوع الأصغري المُميِّز للجسد، Ksi (MPa).

F_r = إجهاد الضغط المتبقي في الجناح ويساوي

= 10 Ksi (68.9 MPa) من أجل المقاطع المُدلفنة، و16.5 Ksi (113.6 MPa) من أجل المقاطع الملحومة.

F_L = أصغر القيمتين $(F_{yf} - F_r)$ أو F_{yw}.

F_{yf} = إجهاد الخضوع الأصغري المميز للجناح، Ksi (MPa).

$$X_1 = (\pi / S_x)\sqrt{EGJA/2}$$
$$X_2 = (4C_w / I_y)(S_x / GJ)^2$$

E = معامل مرونة الفولاذ.

G = معامل مرونة القص.

S_x = معامل المقطع حول المحور الرئيسي، مقدراً بـــ in^3 (mm^3) (بالنسبة لجناح الضغط إذا كان ذلك الجناح أكبر من جناح الشد).

C_w = ثابت الفتل، in^6 (mm^6) (انظر نشرة الـــ AISC حول LRFD).

I_y = عزم العطالة حول المحور الرئيسي، in^4 (mm^4).

ويمكن حساب عزم التحنيب المُحدِّد M_r بالنسبة للأشكال أو المقاطع المذكورة سابقاً، مقدراً بـــ (MPa)، من:

$$M_r = F_L S_x \qquad (9.13)$$

وبما يخص الجيزان ذات المقاطع المرصوصة مع الشرط $L_b \leq L_r$، يكون الانعطاف حول المحور الرئيسي:

$$M_n = C_b\left[M_p - (M_p - M_r)\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right] \leq M_p \quad (9.14)$$

حيث:

$$C_b = 1.75 + 1.05\,(M_1/M_2) + 0.3\,(M_1/M_2) \le 2.3$$

حيث M_1 عزم الانعطاف الأصغر في الطرف الأول وM_2 عزم الانعطاف الأكبر في الطرف الآخر (المسند الآخر) في القطعة اللامقواة من الجائز. وM_1/M_2 موجبة من أجل الانحناء (الانعطاف) السالب، وتساوي إلى 1.0 من أجل الأظفار اللامقواة والجيزان ذات العزوم الأكبر من عزوم القطع اللامقواة المساوية إلى أو الأكبر من أكبر عزميْ طرفيْ القطعة.

(راجع
Galambos, T. V., Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 4th ed., John Wiley & Sons, New York
من أجل استخدام أكبر قيم C_b)

تعطى L_r في القضبان (الجيزان النحيفة) ذات المقطع المستطيل المليء والتي تنحني أو تنعطف حول المحور الرئيسي بـــ:

$$L_r = 57{,}000\left(\frac{r_y}{M_r}\right)\sqrt{JA} \qquad (9.15)$$

ويعطى عزم التحنيب المُحدَّد بـــ؛

$$M_r = F_y\,S_x \qquad (9.16)$$

ويجب أن يتم تعيين M_r، في المقاطع الصندوقية المتناظرة والمحملة في مستوي التناظر والتي تنحني حول المحور الرئيسي، من المعادلة (9.13) وأن يتم تعيين L_r من المعادلة (19.5).

يكون الانعطاف حول المحور الرئيسي، في الجيزان المتراصة مع $L_b > L_r$، مساوياً إلى:

$$M_n = M_{cr} \le C_b\,M_r \quad (9.17)$$

حيث:

M_{cr} = العزم المرن الحرج، Kip.in ‏(MPa.mm).

ومن أجل المقاطع التي تطبق عليها المعادلة (9.17) يكون:

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b}\sqrt{EI_y GJ + I_y C_w \left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2} \qquad (9.18)$$

ويكون M_{cr} بالنسبة للقضبان ذات المقطع المستطيل المليء والمقاطع الصندوقية المتناظرة:

$$M_{cr} = \frac{57{,}000 C_b \sqrt{JA}}{L_b / r_y} \qquad (9.19)$$

بما يخص تعيين المقاومة المرونية للجيزان المصفحة اللامتراصة والأشكال الأخرى اللامغطاة بالمتطلبات (المقويات) السابقة، عُد إلى نشرة الـــ AISC حول الـــ LRFD.

تصميم الإجهاد المقبول للقص المؤثر في المباني

Allowable-Stress Design For Shear In Buildings

تُميِّزُ مواصفات الـــ AISC، الخاصة بتصميم الإجهاد المقبول (ASD)، إجهادات القص المقبولة F_v التالية، مقدرة بـــ Ksi ‏(Ksi × 6.894 = MPa):

$$F_v = 0.40 F_y \qquad \frac{h}{t_w} \le \frac{380}{\sqrt{F_y}}$$

$$F_v = \frac{C_v F_y}{289} \le 0.40 F_y \qquad \frac{h}{t_w} > \frac{380}{\sqrt{F_y}}$$

حيث:

$C_v = 45{,}000\ K_v/F_y\ (h/t_w)^2$ من أجل $C_v < 0.8$

$C_v = \sqrt{36{,}000 K_v / F_y (h/t_w)^2}$ من أجل $C_v > 0.8$

$K_v = 4.00 + 5.34/(a/h)^2$ من أجل $a/h < 1.0$

$k_v = 5.34 + 4.00/(a/h)^2$ من أجل $a/h > 1.0$

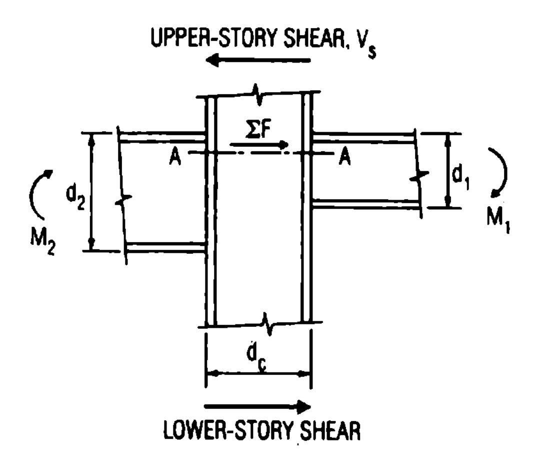
a = المسافة الصافية بين المقوّيات المعترضة (الموضوعة عرضياً أو المستعرضة) ويكون إجهاد القص المقبول في حقل تأثير أو فعل الشد:

$$F_v = \frac{F_y}{289}\left[C_v + \frac{1 - C_v}{1.15\sqrt{1 + (a/h)^2}}\right] \leq 0.40 F_y$$

حيث: $C_v \leq 1$

وعندما يتجاوز القص في الجسد قيمة F_y، تكون عندئذ المقوّيات مطلوبة.

إجهادات القص في الأجساد هي إجهادات كبيرة عموماً وذلك ضمن حدود وصلة صلبة لعنصرين أو أكثر بأجساد تمتد في المستوي المشترك بينها. وتُحدِّدُ جملة التعليقات على مواصفات الـــ AISC للأبنية أن مثل هذه الأجساد يجب أن تكون مسلحةً عندما تكون إجهادات القص المحسوبة، كتلك الإجهادات الموجودة على امتداد المستوي AA في الشكل 9.2، متجاوزةً F_v. يعني: عندما تكون ΣF أكبر من $F_v\ t_w\ d_c$. حيث: d_c هو التدلي (العمق) وt_w ثخانة الجسد للعنصر المقاوم لـــ ΣF.



الشكل 9.2 وصلة صلبة من العناصر الفولاذية بأجساد واقعة في المستوي المشترك

يمكن أن يُحسب القص من العلاقة:

$$\sum F = \frac{M_1}{0.95d_1} + \frac{M_2}{0.95d_2} - V_s$$

حيث:

V_s = القص المؤثر في المقطع.

$M_{1L} + M_{1G} = M_1$

M_{1L} = العزم الناشئ عن الوزن الذاتي في الجانب الموافق لاتجاه الريح على الوصلة.

M_{1G} = العزم الناشئ عن الحمولة الجانبية على الطرف الموافق لاتجاه الريح على الوصلة.

$M_{2L} - M_{2G} = M_2$

M_{2L} = العزم الناشئ عن الحمولة الجانبية على الجانب (الطرف) المجابه لهبوب الرياح على الوصلة.

M_{2G} = العزم الناشئ عن الحمولة الذاتية على الجانب المجابه لهبوب الرياح على الوصلة.

الإجهادات في القشريات الرقيقة Stresses In Thin Shells

يتم التعبير عن نظريتي الانعطاف والأغشية (القشريات) باستخدام واحدات القوى وواحدات العزم التي تؤثر أو تفعل بواحدة الطول فوق ثخانة رقيقة من القشرة. ولحساب واحدات الإجهادات الناتجة عن تأثير هذه القوى والعزوم، فإن الطريقة الاعتيادية المتبعة هي افتراض قوى ناظمية وقوى قص موزعة بانتظام على ثخانة القشرة وإجهادات انعطاف موزعة بصورة خطية.

وبالتالي، يمكن أن تُحسب الإجهادات الناظمية من معادلات من الشكل:

$$f_x = \frac{N_x}{t} + \frac{M_x}{t^3/12} z \qquad (9.20)$$

حيث:

z = المسافة بدءاً من منتصف السطح.

t = ثخانة القشرة.

M_x = واحدة عزم الانعطاف حول المحور الموازي لاتجاه واحدة القوة الناظمية N_x.

وبطريقة مماثلة، يمكن أن تُحسب إجهادات القص الناتجة عن قوى القص المركزية T وعزوم الفتل D من معادلات من الشكل:

$$V_{xy} = \frac{T}{t} \pm \frac{D}{t^3/12} z \qquad (9.21)$$

وإجهادات القص الناظمية يمكن أن تُحسب بالاستناد على فرضية أن توزّع الإجهاد على شكل قطع مكافئ فوق ثخانة القشرة:

$$V_{xz} = \frac{V}{t^3/6}\left(\frac{t^2}{4} - z^2\right) \quad (9.22)$$

حيث: V = واحدة قوة القص الناظمية على منتصف (وسط) السطح.

صفائح التحميل Bearing Plates

يتم تعيين طول التحميل الأصغري N لصفيحة التحميل، في الاتجاه الموافق لمجاز الجائز، لمقاومة رد فعل الجائز، بوساطة المعادلات الخاصة بمنع الخضوع المحلي للجسد وكذا إرهاق الجسد. فتكبير N يكون مرغوباً عادةً إلا أنه يمكن أن يكون منحسراً ومحدداً بتوفير ثخانة كافية.

عندما تغطي الصفيحة المساحة الكاملة للمسند البيتوني، فإن مساحة الصفيحة المطلوبة، مقدرة بـــ in^2 (mm^2)، هي:

$$A_1 = \frac{R}{0.35f'_c}$$

حيث:

R = رد فعل الجائز، Kip (KN).

f'_c = مقاومة الضغط المميزة (النوعية) للبيتون، Ksi (MPa).

وعندما تغطي الصفيحة مساحة تقل عن المساحة الكاملة للمسند البيتوني، فإن مساحتها، وفق ما هو مُحدَّد في الجدول 9.3، تُعطى بـــ:

$$A_1 = \left(\frac{R}{0.35f'_c\sqrt{A_2}}\right)^2$$

حيث:

A_2 = مساحة المقطع العرضي كاملةً للمسند البيتوني، in^2 (mm^2).

الجدول 9.3 إجهاد التحميل المسموح (المقبول) F_b، على البيتون والحجر*

المساحة كاملة للمسند البيتوني	$0.35\,f'_c$
أقل من المساحة الكاملة للمسند البيتوني	$0.35f'_c\sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \le 0.70f'_c$
حجر رملي وحجر جيري	0.40
قرميد أو طوب من الملاط الاسمنتي	0.25

* الواحدة بـ: MPa = 6.895 × Ksi

بتثبيت قيمة N، المدوَّرة عادةً إلى عدد صحيح من الإنشات (الميلمترات)، يمكن أن يُحسب العرض الأصغري للصفيحة B، مقدراً بـــ in (mm)، بتقسيم A_1 على N ثم تدوير الناتج إلى عدد صحيح من الإنشات (الميليمترات) وبحيث يكون $BN \ge A_1$.

وبالتالي يساوي ضغط التحميل الفعلي f_b أسفل الصفيحة، مقدراً بـــ Ksi (MPa)، إلى:

$$f_p = \frac{R}{BN}$$

تُعيَّن ثخانة الصفيحة عادةً بالاستناد على فرضية الانعطاف الظفري للصفيحة:

$$t = \left(\frac{1}{2}B - k\right)\sqrt{\frac{3f_p}{F_b}}$$

حيث:

t = الثخانة الأصغرية للصفيحة، in (mm)

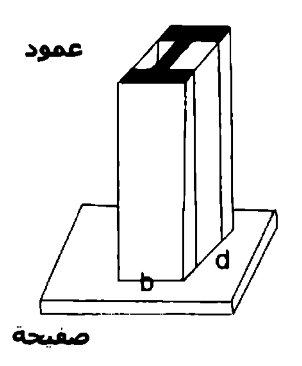
k = المسافة من أسفل الجائز إلى قمة عصابة الجسد ، مقدرة بـــ in (mm).

F_b= إجهاد الانعطاف المقبول للصفيحة، Ksi (MPa).

صفائح قواعد الأعمدة Column Base Plates

لابد أن تؤخذ المساحة A_1، المقدرة بـ in^2 (mm^2)، المطلوبة لصفيحة القاعدة تحت العمود المستند على البيتون من المعادلة التي سبق ذكرها، مع أخذ R كحمولة إجمالية على العمود، مقدرة بـ Kip، أو من المعادلة:

$$A_1 = \frac{R}{0.70f'_c}$$



وما لم تكن بروزات الصفيحة إلى ما بعد حدود العمود صغيرةً، فيمكن أن تُصمَّم الصفيحة كظفر يُفترض أنه موثوق عند حواف مستطيل ذي أضلاع تساوي إلى 0.80 b و 0.95 d، حيث b عرض جناح العمود، in (mm)، و d عمق العمود، in (mm).

وللتقليل من متطلبات المواد إلى الحد الأدنى، يفترض أن تؤخذ بروزات الصفيحة متساوية تقريباً. ولتحقيق هذا الغرض، فإن طول الصفيحة N (وفق اتجاه d) يمكن أن يؤخذ، مقدراً بـ in (mm)، وفق العلاقة:

$$N = \sqrt{A_1} + 0.5(0.95d - 0.80b)$$

وبالتالي يمكن أن يُحسب عرض الصفيحة B، مقدراً بـ in (mm)، بتقسيم A_1 على N.

ويمكن أن يتم اختيار كل من B و N بعدد صحيح من الإنشات (الميليمترات) بحيث تتحقق $BN \geq A_1$. وفي تلك الحالة، يمكن أن يتم تعيين ضغط التحميل f_p، Ksi (MPa)، من المعادلة السابقة. وثخانة الصفيحة، المعينة بالانعطاف الظفري، تعطى بالعلاقة:

$$t = 2p\sqrt{\frac{f_p}{F_y}}$$

حيث:

F_y = مقاومة الخضوع المميزة الأصغرية للصفيحة، Ksi (MPa).

p = أكبر من القيمتين: 0.5 (N - 0.95 d) و 0.5 (B - 0.80 b)

عندما تكون بروزات الصفيحة صغيرة، فإن المساحة A_2 يجب أن تؤخذ كمساحة أعظمية للجزء من سطح الاستناد المشابه هندسياً والمتمركز مع المساحة المُحمّلة. وعليه، في مقطع العمود الذي على شكل H، يمكن أن تُفرض حمولة العمود موزعة على البيتون فوق مساحة المقطع ذي الشكل H بثخانة جناح L، مقدرة بـ in (mm)، وثخانة جسد 2L:

$$L = \frac{1}{4}(d+b) - \frac{1}{4}\sqrt{(d+b)^2 - \frac{4R}{F_p}}$$

حيث:

F_b = ضغط التحميل المقبول على المسند، Ksi (MPa).

(إذا كان L عدداً تخيلياً، فإنه يمكن افتراض أن الجزء المُحمَّل من سطح الاستناد مستطيل وفقاً للمناقشة السابقة.) ويجب أن تؤخذ ثخانة صفيحة القاعدة مساوية لأكبر القيم المحسوبة من المعادلة السابقة ومن المعادلة:

$$t = L\sqrt{\frac{3f_p}{F_b}}$$

التحميل على السطوح المدلفنة (سطوح إسناد غير مُثبتة)

Bearing On Milled Surfaces

إجهاد التحميل المقبول على السطوح المدلفنة التي تتضمن مقوّيات تحميل ودُسر (مسامير كبيرة) مغروسة في ثقوب موسعة أو محفورة أو مجوّفة، وذلك في إنشاء الأبنيَة، هو: $F_b = 0.90\ F_y$، حيث، F_y مقاومة الخضوع للفولاذ، Ksi (MPa).

وبما يخص تمدُّد الدلافين والقطع المهتزة، يكون إجهاد التحميل المقبول، مقدراً بـــ Kip/linear in (KN/mm)، مساوياً إلى:

$$F_p = \frac{F_y - 13}{20} 0.66d$$

حيث: d قطر الدلفين أو القطعة المهتزة، مقدراً بـــ in (mm).

وعندما يكون للأجزاء المتماسة مقاومات خضوع مختلفة، فإن F_y هي القيمة الأصغر.

صفائح تقوية الجيزان العرضية الرئيسية في المباني

Plate Girders In Buildings

لابد من تمركز ثقل المقطع العرضي لصفيحة الجائز قدر ما أمكن عملياً في الأجنحة وعلى أبعد مسافة من المحور المحايد وذلك للحصول على أكبر مقاومة للانعطاف.

وقد يتطلب هذا، بطبيعة الحال، جسداً نحيفاً بحيث ينهار الجائز العرضي الرئيسي بالتحنيب قبل أن يصل إلى السعة الانعطافيّة (قدرة استيعاب أكبر عزم انعطاف ممكن).

ولمنع وقوع هذا، تُحدِّدُ مواصفات AISC النسبة h/t.

فمن أجل الجسد اللامقوى، يجب ألا تتجاوز هذه النسبة:

$$\frac{h}{t} = \frac{14,000}{\sqrt{F_y (F_y + 16.5)}}$$

حيث: F = مقاومة خضوع جناح الضغط، مقدرة بـــ Ksi (MPa).

ومهما يكن من أمر، يمكن استخدام أكبر قيم للنسبة h/t، في حال كان الجسد مقوى وعلى مجالات أو تباعدات ملائمة.

ولتحقيق هذا الغرض، يمكن أن تقوّى الأجنحة الشاقولية بربطها بالجسد أو عن طريق صفائح شاقولية ملحومة بها (بالأجنحة). ورغم ذلك، فإن هذه المقوّيات العرضية لا تكون مطلوبة عندما تكون النسبة h/t أقل من القيمة المحسوبة من المعادلة السابقة أو من الجدول 9.4.

الجدول 9.4 القيمة الحرجة للنسبة h/t الخاصة بصفائح تقوية الجيزان الرئيسية في الأبنية

F_y, ksi	(MPa)	$\frac{14,000}{\sqrt{F_y (F_y + 16.5)}}$	$\frac{2,000}{\sqrt{F_y}}$
36	(248)	322	333
50	(345)	243	283

وإذا ما توضّعت المقويات العرضية بتباعدات لا تزيد عن 1.5 مرة من عمق (تدلي) الجائز الرئيسي، فإن نسبة

$$\frac{\text{العمق النظيف (الصافي) للجسد}}{\text{الثخانة (للصفيحة)}}$$

قد تصل إلى أكبر ما يمكن:

$$\frac{h}{t} = \frac{2000}{\sqrt{F_y}}$$

وعلى أي حال، إذا ما تجاوزت نسبة عمق الجائز/ثخانة الصفيحة (h/t) القيمة $760/\sqrt{F_b}$، حيث F_b هو إجهاد الانعطاف المقبول في طاولة (جناح) الضغط المطبق عليها بصورة اعتيادية، فإن هذا الإجهاد يجب أن يُخفَّض إلى F_b' وفق المعادلات التالية:

$$F_b' = R_{PG} R_e F_b$$

$$R_{PG} = \left[1 - 0.0005 \frac{A_w}{A_f}\left(\frac{h}{t} - \frac{760}{\sqrt{F_b}}\right)\right] \le 1.0$$

$$R_e = \left[\frac{12 + (A_w / A_f)(3\alpha - \alpha^3)}{12 + 2(A_w / A_f)}\right] \le 1.0$$

حيث:

A_w = مساحة الجسد، in^2 (mm^2).

A_f = مساحة جناح الضغط، in^2 (mm^2).

$\alpha = 0.6\ F_{yw}/F_b \le 1.0$

F_{yw} = إجهاد الخضوع الأصغري المُميَّز لفولاذ الجسد، مقدراً بـــ Ksi (MPa).

في الجائز المختلط (الفولاذي – البيتوني)، وحيث يكون لفولاذ الجناح مقاومة خضوع أكبر من مقاومة خضوع فولاذ الجسد، فإن تطبيق المعادلات السابقة يقي دون وقوع خضوع مفرط أو زائد عن المقاومة المنخفضة للجسد في جوار المقاومة الأعلى للأجنحة. أمّا بما يخصُّ الجيزان اللامختلطة فيكون: $R_e = 1.0$.

توزيع الحمولة على الهياكل الإطارية المستعرضة* وعلى الجدران القصية

Load Distribution To Bents And Shear Walls

القيام بنقل الحمولات الجانبية هو تدبير احتياطي لازم وضروري في كافة المنشآت، وكمثال على ذلك نأخذ تلك الحمولات الناشئة عن الرياح والزلازل وكذا الحمولات الناشئة عن آليّات جر وكبح الحافلات، المؤثرة على أساسات ونقاط استناد المنشآت حيث يكون لهذه الأساسات والمساند مقاومة عالية ضد الإزاحات. لهذا الغرض، يمكن أن يتم استخدام أنواع مختلفة من وسائل التقوية المتضمنة الدعائم المؤازرة والأربطة الشدية والجيزان الشبكية والجدران القصيّة ومخمّدات الاهتزازات.

تشوهات الهياكل الإطارية والجدران القصية

التشوّهات الأفقية الواقعة في مستويات الهياكل الإطارية والجدران القصيّة يمكن أنْ تُحسب بالاستناد على فرضيّة أنها تعمل كأظفار. والتشوّهات في الهياكل الإطارية المقوّاة يمكن أن تُحسب بطريقة الحمولة الوهمية الواحدية أو بالطريقة المصفوفية.

أما التشوهات في الإطارات (البورتيكات) الصلبة فيمكن أن تُحسب بجمع انزياحات الطوابق وفق ما هو مُحدَّد في طريقة توزيع العزوم أو بالطريقة المصفوفية.

التشوّه في مستوي الجدار القصي (الشكل 9.3) المُحرَّض أو الناتج عن تأثير حمولة واقعة في مستوي الجدار أيضاً، إن هو إلا مجموع التشوّه المرن للجدار كظفر والتشوّه الناتج عن القص. وهكذا، ففي جدار ذي مقطع مستطيل كتيم، يكون التشوّه في أعلى الجدار الناتج عن الحمولة المنتظمة مساوياً:

* المقصود بهذا التعبير الهيكل الإنشائي الإطاري الموضوع بشكل عرضي للتصدي للحمولات الجانبية بشكل أساسي وللحمولات الشاقولية أيضاً. (المعدّ).

$$\delta = \frac{1.5wH}{Et}\left[\left(\frac{H}{L}\right)^3 + \frac{H}{L}\right]$$

حيث:

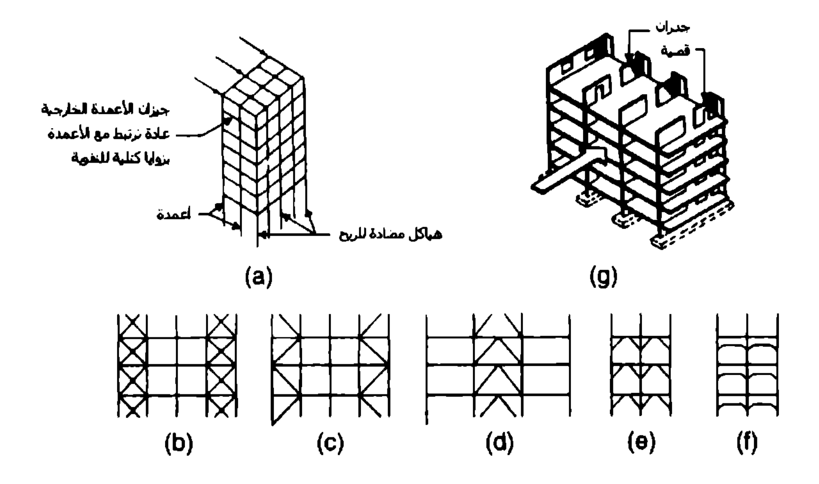
w = الحمولة الموزعة الجانبية.

H = ارتفاع الجدار.

E = عامل مرونة مادة الجدار.

t = ثخانة الجدار

L = طول الجدار



الشكل 9.3 إطار مبنى هيكلي يقاوم القوى الجانبية (الأفقية) مع:

(a) هياكل مقاومة للرياح أو (g) جدران قصية أو مركب من الاثنين. ويمكن للهياكل أن تقوّى بعدة طرق، تتضمن:

(b) المقوّي على شكل X، (c) المقوّي على شكل K، (d) المقوّي على شكل V مقلوبة، (e) المقوّي المرفقي (يشبه الركبة)، (f) الروابط الصلبة.

ومن أجل جدار قصي بحمولة مركزة P في أعلاه، يكون التشوّه في الأعلى:

$$\delta_c = \frac{4P}{Et}\left[\left(\frac{H}{L}\right)^3 + 0.75\frac{H}{L}\right]$$

وإذا ما كان الجدار مثبتاً ضد الدوران في أعلاه، فيكون التشوه في واقع الحال مساوياً إلى:

$$\delta_f = \frac{P}{Et}\left[\left(\frac{H}{L}\right)^3 + 3\frac{H}{L}\right]$$

والواحدات المستخدمة في هذه المعادلات هي تلك الواحدات المطبقة على نحو شائع في قياسات نظام الولايات المتحدة المتبع (USCS) وكذا في النظام الدولي (SI)، يعني الواحدات Kip (KN) وlb/in^2 (MPa) و ft (m) و in (mm).

عندما تحوي الجدران القصية على فتحات، مثل الأبواب أو الممرات أو النوافذ، تصبح حسابات التشوّه والصلابة أكثر تعقيداً. ومهما يكن من أمر، فإن طرقاً تقريبية يمكن استخدامها.

الضغط المحوري المركب أو الشد مع الانعطاف

Combined Axial Compression Or Tension And Bending

مواصفات الـــ AISC الخاصة بتصميم الإجهاد المقبول للأبنية، تتضمن ثلاث صيغ متبادلة التأثير لحساب الضغط المحوري المركب والانعطاف.

عندما تتجاوز نسبة الإجهاد المحوري المحسوب على الإجهاد المحوري المسموح f_a/F_a، القيمة 0.15، فلابد من تحقق كل من المعادلتين التاليتين:

$$\frac{f_a}{F_a}+\frac{C_{mx} f_{bx}}{(1-f_a / F'_{ex})F_{bx}}+\frac{C_{my} f_{by}}{(1-f_a / F'_{ey})F_{by}} \leq 1$$

$$\frac{f_a}{0.60F_y}+\frac{f_{bx}}{F_{bx}}+\frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1$$

وعندما يكون $f_a/F_a \leq 0.15$، فيمكن استخدام المعادلة التالية عوضاً عن المعادلتين السابقتين:

$$\frac{f_a}{F_a}+\frac{f_{bx}}{F_{bx}}+\frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1$$

يُحدد الدليلان x وy، في المعادلات السابقة، محور الانعطاف الذي يحدث حوله الإجهاد و:

F_a = الإجهاد المحوري الذي سيكون مسموحاً في حال كانت القوة المحورية لوحدها، Ksi (MPa).

F_b = إجهاد ضغط الانعطاف الذي سيسمح في حال كان عزم الانعطاف لوحده، Ksi (MPa).

$F'_e = 149{,}000/(Kl_b/r_b)^2$, Ksi (MPa) . أمّا بالنسبة لـــ F_a، F_b و$0.6\ F_y$، F'_e فيمكن زيادتها إلى الثلث (يعني أن يضاف إلى قيمتها ثلث قيمتها أيضاً) من أجل حمولات الرياح وحمولات الزلازل.

l_b = الطول الفعلي اللامقوّى في مستوي الانعطاف، in (mm).

r_b = نصف قطر العطالة (الدوران) حول محور الانعطاف، in (mm).

K = عامل الطول الفعّال في مستوي الانعطاف.

f_a = الإجهاد المحوري المحسوب، Ksi (MPa).

f_b = إجهاد ضغط الانعطاف المحسوب في النقطة المُعتبرة، Ksi (MPa).

C_m = أمثال التعديل.

الأجساد الواقعة تحت تأثير حمولات مركّزة

Webs Under Concentrated Loads

معايير خاصة بالأبنية

تَضَعُ مواصفات الـــ AISC، الخاصة بحمولة التصميم المقبولة (ASD) للأبنية حدّاً لإجهاد الضغط في الأجساد وذلك لمنع الخضوع المكاني للجسد. ففي الجائز المدلفن تكون مقوّيات التحميل مطلوبة عند تطبيق الحمولة المركزة في حال كان الإجهاد f_a، المقدّر بــ Ksi (MPa)، متجاوزاً في مكان اتصال أو ارتكاز الجسد مع زاوية الالتحام القيمة $F_a = 0.66\ F_{yw}$، حيث F_{yw} هو إجهاد الخضوع المميز الأصغري لفولاذ الجسد مقدراً بــ Ksi (MPa). وفي عملية حساب المساحة المُجهَدة، يمكن أن تُفرض الحمولة موزعة على المسافة الموضحة بالشكل 9.4

بما يخص الحمولة المركزة المطبقة عند مسافة أكبر من عمق الجائز، وذلك بدءاً من طرف الجائز، يكون:

$$f_a = \frac{R}{t_w (N + 5k)}$$

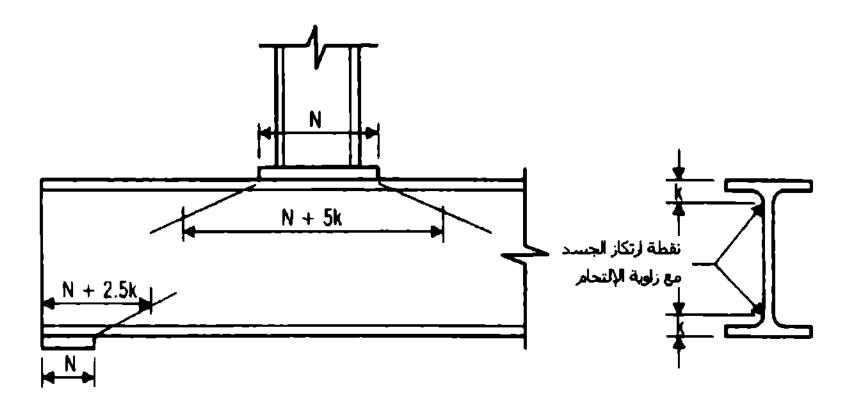
حيث:

R = حمولة رد الفعل المركزة، Kip (kN).

t_w = ثخانة الجسد، in (mm).

N = طول التحميل، in (mm)، (بالنسبة لرد فعل المسند لا يقل عن k).

k = المسافة من السطح أو الوجه الخارجي للجناح إلى نقطة ارتكاز الجسد مع زاوية الالتحام، مقدرة بـــ in (mm).



الشكل 9.4 بما يخص عملية التحقق من خضوع الجسد، تُفرَض الإجهادات موزعة على أطوال الجسد المُحدَّدة بأشكال التحميل، حيث N هو طول صفائح التحميل، وk هي المسافة من الوجه الخارجي للجائز إلى نقطة ارتكاز الجسد مع زاوية الالتحام.

أمّا بما يخص الحمولة المركزة المطبقة بشكل قريب من مسند الجائز، فيكون:

$$f_a = \frac{R}{t_w (N + 2.5k)}$$

ولمنع زحف الجسد، توصي مواصفات الـــ AISC بأن تكون مقويات التحميل (صفائح التقوية) مضافة على الأجساد مكان وقوع الحمولات المركزة عندما تتجاوز قوة الضغط قيمة R، المقدرة بـــ Kip (kN)، المحسوبة وفق ما يلي:

ـــ من أجل حمولة مركزة مطبقة على مسافة من مسند الجائز تساوي على الأقل d/2، حيث d عمق الجائز، تكون:

$$R = 67.5t_w^2\left[1+3\left(\frac{N}{d}\right)\left(\frac{t_w}{t_f}\right)^{1.5}\right]\sqrt{F_{yw}t_f/t_w}$$

حيث: t_f = ثخانة الجناح، in (mm)

ومن أجل حمولة مركزة مطبقة على مسافة أقرب من d/2 من مسند الجائز، تكون:

$$R = 34t_w^2\left[1+3\left(\frac{N}{d}\right)\left(\frac{t_w}{t_f}\right)^{1.5}\right]\sqrt{F_{yw}t_f/t_w}$$

إذا كانت المقوّيات مزوّدة وممتدة على الأقل بنصف طول الجسد، فلا حاجة عندئذ لحساب قيمة R.

الاعتبار الآخر هو منع التحنيب الجانبي للجسد. فتوصي مواصفات الـ AISC بمقوّيات التحميل عندما تتجاوز قوة الضغط الناتجة عن الحمولة المركّزة الحدود التي تعتمد على النحافة النسبية للجسد والجناح r_{wf} وعلى إذا ما كان الجناح المُحمَّل معاقاً ضد الدوران أم لا:

$$r_{wf} = \frac{d_c/t_w}{l/b_f}$$

حيث:

l = أكبر طول غير مقوًى على امتداد الجناح العلوي أو السفلي في نقطة تطبيق الحمولة، مقدراً بـ in (mm).

b_f = عرض الجناح، in (mm)؛

d_c = عمق الجسد الصافي المقاس بدءاً من زاويتيْ الالتحام ويساوي؛

$$d_c = d - 2k$$

وتكون المقوّيات مطلوبة إذا ما تجاوزت الحمولة المركزة قيمة R المقدرة بـــ Kip (kN) والمحسوبة من:

$$R = \frac{6800 t_w^3}{h} (1 + 0.4 r_{wf}^3)$$

حيث:

h = المسافة الصافية بين الجناحين، in(mm).

و r_{wf} تكون أقل من 2.3 عندما يكون الجناح المُحمَّل معاقاً ضد الدوران.

أمّا إذا كان الجناح المحمل غير معاق ضد الدوران وكانت r_{wf} أقل من 1.7 فإن:

$$R = 0.4 r_{wf}^3 \frac{6800 t_w^3}{h}$$

عندما تكون قيم r_{wf} أكبر من القيم السابقة المذكورة، فلا حاجة عندئذٍ لحساب R.

تصميم صفائح التقوية الواقعة تحت تأثير الحمولات

Design Of Stiffeners Under Loads

توصي مواصفات الـــ AISC بتلك المقوّيات (صفائح التقوية) واللحامات لوصلات أطراف الجيزان والعوارض الرئيسية والجيزان الشبكية المُصمَّمة للتصدي لتأثير القوى المركّب الناتج عن العزم والقص المفتعليْن بصلابة الوصلة. فعندما تكون أجنحة أو صفائح الوصل المضادة للعزوم، الخاصة بوصلات أطراف الجيزان والعوارض الرئيسية، ملحومةً بجناح عمود على شكل I أو H، فإنه يكون لزوجيْ صفيحتي تقوية جسد العمود مساحة مقطع عرضي مركب A_{st} لا تقل عن تلك المساحة المحسوبة من المعادلة اللاحقة والتي يجب أن تضاف إلى مساحة الجسد كلما كانت القيمة المحسوبة لـــ A_{st} موجبة.

$$A_{st} = \frac{P_{bf} - F_{yc} t_{wc} (t_b + 5k)}{F_{yst}}$$

حيث:

F_{yc} = إجهاد خضوع العمود، Ksi (MPa).

F_{yst} = إجهاد خضوع صفيحة التقوية، Ksi (MPa).

K = المسافة بين الوجه الخارجي لجناح العمود ونقطة ارتكاز الجسد مع زاوية الالتحام، وذلك إذا كان العمود هيكلاً مدلفناً، أو المسافة المكافئة إذا كان العمود هيكلاً ملحوماً، مقدرة بـ in (mm).

P_{bf} = القوة المحسوبة المنقولة بجناح صفيحة وصل التصدي للعزم مضروبةً بـ $\frac{5}{3}$ وذلك عندما تكون القوة ناشئة عن حمولة حية وميتة فقط، أو مضروبة بـ 4/3 عندما تكون القوة المحسوبة ناشئة عن حمولة حية وميتة مع قوى (حمولات) الرياح أو الزلازل، Kip (kN).

t_{wc} = ثخانة جسد العمود، in (mm).

t_b = ثخانة الجناح أو صفيحة وصل التصدي للعزم التي تنقل القوة المركزة، in (mm).

بالرغم من المستلزمات السابقة، إلا أنه لابد من تزويد صفيحة أو زوج من صفائح التقوية فوق جناح ضغط الجائز عندما يكون عمق جسد العمود الصافي (النظيف) الواقع بين نقطتي اتصال الجسد مع زاويتي الالتحام d_c أكبر من:

dc

$$d_c = \frac{4100 t_{wc}^3 \sqrt{F_{yc}}}{P_{bf}}$$

كما لابد من تزويد زوج من صفائح التقوية فوق جناح الشد عندما تكون ثخانة جناح العمود t_f أقل من:

$$t_f = 0.4\sqrt{\frac{P_{bf}}{F_{yc}}}$$

إن المقوّيات (صفائح التقوية) التي تمّ تزويدها بواسطة المعادلات السابقة لابد وأنْ تتوافق مع المعايير الإضافية التالية:

1. يجب ألا يقل عرض كل صفيحة تقوية زائد نصف ثخانة جسد العمود عن ثلث عرض الجناح أو صفيحة وصلة التصدي للعزم الذي أو التي تنقل القوة المركزة.

2. يجب ألا تقل ثخانة صفائح التقوية عن $t_b/2$.

3. يجب على مقويّات لحام الربط بجسد العمود أن تكون بقياس يتحمل القوة المؤثرة في صفيحة التقوية التي سببها العزوم اللامتوازنة (غير متساوية) على الوجهين المتقابلين للعمود.

عناصر التثبيت في الأبنية Fasteners In Buildings

تُميّزُ مواصفات الــ AISC الخاصة بالإجهادات المقبولة على الأبنية إجهادات الشد والقص الواحديّة المقبولة المؤثرة على المقطع من الجزء المحلزن واللامحلزن من البراغي.

(عموماً، يجب ألا تُستخدم البراشيم المُعرَّضة لشد مباشر).

عندما ينضم تأثير حمولة الريح أو حمولة الزلازل مع الحمولات الثقالية، فيمكن زيادة الإجهادات المسموحة إلى الثلث.

إن معظم الأبنية تُشيَّد بمساعدة وصلات التحميل. وتُطبَّق إجهادات التحميل المقبولة على كلٍ من وصلات التحميل ووصلات الانزلاق الحرج. ويكون إجهاد التحميل المقبول في الأبنية F_p على المساحة المُسقطة (المقطع العرضي المعامد للإجهاد) لعناصر التثبيت، مقدراً بـــ Ksi (MPa)، مساوياً إلى:

$$F_p = 1.2\ F_u$$

حيث: F_u مقاومة الشد للجزء الموصول، Ksi (MPa).

ويجب أن تكون المسافة المقاسة في خط تأثير القوة إلى أقرب حافة من الجزء الموصول (المسافة الطرفية) على الأقل 1.5d، حيث d قطر عنصر التقوية. ويجب أن يكون التباعد من المركز إلى المركز بين عناصر التثبيت على الأقل 3d.

Composite Construction الإنشاءات المختلطة

تُوصل وتدمج الجيزان الفولاذية مع البلاطة البيتونية في الإنشاء المختلط بحيث تعمل مع بعضها لمقاومة الحمولة المؤثرة على الجائز. وتعمل البلاطة، فعلياً، كصفيحة تغطية. وبالنتيجة، يمكن استخدام مقطع فولاذي خفيف (فولاذ قليل).

الإنشاء المختلط في المباني

ثمة طريقتان أساسيتان للإنشاء المختلط:

الطريقة 1. فولاذ الجائز مغلّف كلياً بالبيتون. يعتمد الإنشاء المختلط في هذه الحالة على الحافة (التعشيقة) البيتونية الفولاذية بمفردها. وبما أن الجائز مقوّى تماماً جانبياً، يكون الإجهاد المقبول في الأجنحة $0.66\ F_y$، حيث F_y مقاومة الخضوع للفولاذ، مقدرة بـ Ksi (MPa). وبفرض أن الفولاذ يعبأ بتحمل كامل الحمولة الميتة وأن المقطع المختلط يتحمل الحمولة الحية، يكون إجهاد الواحدة الأعظمي في الفولاذ، مقدرا بـ Ksi (MPa):

$$f_s = \frac{M_D}{S_s} + \frac{M_L}{S_{tr}} \le 0.66 F_y$$

حيث:

M_D = عزم الحمولة الميتة، in.Kip (kN.mm).

M_L = عزم الحمولة الحية، in.Kip (kN.mm).

S_s = معامل مقطع فولاذ الجائز، in^3 (mm^3).

S_{tr} = معامل مقطع المقطع المختلط المحوَّل (المكافئ)، in^3 (mm^3).

تسمحُ مواصفاتِ الـــ AISC باستخدامِ طريقة مختصرة. فتفترض هذه الطريقة أن الفولاذ يعبأ بكلٍّ من الحمولات الحية والميتة، ويُعوَّضُ عن هذا بالسماح بإجهاد أكبر في الفولاذ:

$$f_s = \frac{M_D + M_L}{S_s} \leq 0.76F_y$$

الطريقة 2. الجائز الفولاذي مُرتبط بالبلاطة البيتونية بوصلات قصيّة.

يعتمد التصميم على الحمولة الحدّية وهو مستقل عن استخدام الدواعم المؤقتة لسند الفولاذ حتى تصلُّب البيتون. ويكون الإجهاد الأعظمي في الجناح السفلي مساوياً لـــ:

$$f_s = \frac{M_D + M_L}{S_{tr}} \leq 0.66F_y$$

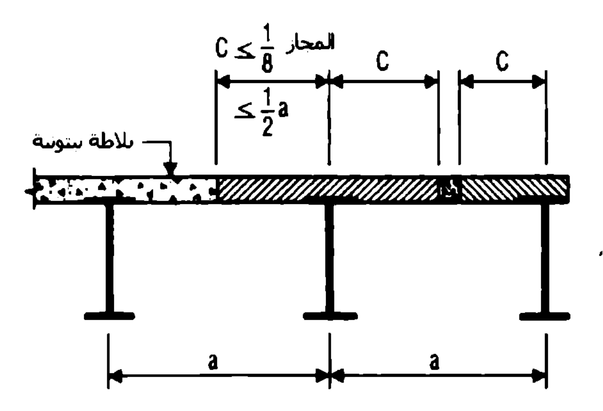
وللحصول على المقطع المختلط المُحوَّل، يُعامل البيتون الواقع فوق المحور المحايد كمساحة فولاذية مكافئة وذلك بتقسيم مساحة البيتون على n، وهي نسبة معامل مرونة الفولاذ إلى معامل مرونة البيتون. وفي عملية حساب أو تعيين المقطع المحوَّل (المكافئ)، يمكن أن يُعتبر جزء من البلاطة البيتونية، الواقع فوق الجائز، فعالاً في مقاومة إجهادات الضغط المرونية (مناطق العزم الموجب).

عرض البلاطة، على أحد جانبي خط مركز الجائز (الخط المحوري الطولاني للجائز)، الممكن اعتباره فعّالاً، يجب ألا يتجاوز أي واحدة من القيم التالية:

1. ثُمن مجاز الجائز المأخوذ بين مركزي الاستناد.

2. نصف المسافة إلى خط مركز الجائز المجاور.

3. المسافة من خط مركز الجائز إلى حافة البلاطة. (الشكل 9.5).



الشكل 9.5 تحديدات للأبعاد خاصة بالعرض الفعّال للبلاطة البيتونية في جائز مختلط فولاذي بيتوني.

عدد روابط الوصل المطلوبة في إنشاء المباني

Number Of Connectors Required For Building Construction

يُحسب العدد الإجمالي للروابط، لمقاومة V_h، من V_h/q. حيث : q القص المقبول لرابط واحد، مقدراً بـــ Kip (kN). وتعطى قيم q للروابط في الأبنية ضمن توجيهات التصميم الإنشائية.

يمكن أن يُباعد العدد المطلوب من روابط القص على نحوٍ منتظم فيما بين مقاطع العزم الأعظمي والعزم الصفري. ويجب أن يكون لروابط القص غطاء بيتوني مقداره 1 in (25.4 mm) على الأقل. وما لم تكن الدُّسر واقعة فوق الجسد مباشرة، فإنه يجب ألا تتجاوز أقطار الدُّسر 2.5 مرة من ثخانة جناح الجائز.

ومع وجود حمولات مركزة ثقيلة فقد لا يكون التباعد المنتظم لروابط القص كافياً

فيما بين الحمولة المركزة وأقرب نقطة من العزم الصفري. لذا يجب أن يكون عدد روابط القص في هذه المنطقة مساوياً على الأقل إلى:

$$N_2 = \frac{N_1[M\beta / M_{max}) - 1]}{\beta - 1}$$

حيث:

M = العزم في نقطة تطبيق الحمولة المركزة، ft.Kip (kN.m).

M_{max} = العزم الأعظمي في المجاز، ft.Kip (kN.m).

N_1= عدد روابط القص المطلوبة بين M_{max} والعزم الصفري.

$\beta = S_{tr}/S_s$ or S_{eff}/S_s، حسبما هو ملائم.

S_{eff} = معامل المقطع الفعّال من أجل مقطع مختلط يعمل جزئياً، in^3 (mm^3).

القص الفاعل على الروابط

إن القص الإجمالي الأفقي المُقاوَم بالروابط القصيّة في منشأة المبنى يؤخذ كقيمة صغرى ناتجة عن إحدى المعادلتين التاليتين:

$$V_h = \frac{0.85 f'_c A_c}{2}$$

$$V_h = \frac{A_s F_y}{2}$$

حيث:

V_h = القص الإجمالي الأفقي الواقع بين العزم الموجب الأعظمي وأحد نقطتي استناد الجائز الفولاذي (أو بين العزم الموجب الأعظمي ونقطة تغيّر اتجاه الانعطاف في الجائز المستمر)، مقدراً بـــ Kip (kN).

f'_c = مقاومة الضغط المميزة للبيتون في اليوم الثامن والعشرين، Ksi (MPa).

A_c = المساحة الفعلية لجناح البيتون الفعّال، in^2 (mm^2).

A_s = مساحة الجائز الفولاذي، in^2 (mm^2).

يمكن أنْ يُؤخذ فولاذ التسليح الطولاني في الإنشاء المختلط المستمر (جيزان مستمرة) فاعلاً بتعاضده واختلاطه مع الجائز الفولاذي في مناطق العزوم السالبة. وفي هذه الحالة يجب أن يؤخذ القص الإجمالي الأفقي، الواقع بين مسند داخلي وإحدى نقطتيْ تغيّر اتجاه مخطط الانعطاف المجاورة، وفق العلاقة:

$$V_h = \frac{A_{sr} F_{yr}}{2}$$

حيث:

A_{sr} = مساحة التسليح الطولاني عند المسند داخل المساحة الفعّالة، in^2 (mm^2).

F_{yr} = إجهاد الخضوع المُميّز الأصغري للتسليح الطولاني، Ksi (MPa).

اعتبارات خاصة بتشكل البرك المائية في المباني

Ponding Considerations In Buildings

السقوف المُنبسطة المُحتمل أنْ تتراكم المياه عليها قد تتطلب تحليلاً لضمانة أنها مستقرة ومتوازنة تحت شروط تشكّل برَكُ الماء. إلاّ أن هذه السقوف المنبسطة يمكن أن تُعتبر متوازنة وأنها ليست بحاجة لأي تحليل إنشائي إذا ما تحقّقت المعادلتان التاليتان:

$$C_p + 0.9\, C_s \le 0.25$$

$$I_d \ge 25\, S^4/10^6$$

حيث:

$C_p = 32\ L_s\ L^4_p/10^7\ I_p$

$C_s = 32\ S\ L^4_s/10^7\ I_s$

L_p = طول العنصر الأولي أو العارضة الرئيسية، ft (m).

L_s = طول العنصر الثانوي أو الرافدة الثانوية (الأفقية)، ft (m).

S = تباعد العناصر الثانوية، ft (m).

I_p = عزم عطالة العنصر الأولي، in^4 (mm^4).

I_s = عزم عطالة العنصر الثانوي، in^4 (mm).

I_d = عزم عطالة مقطع الدعم السطحي الفولاذي المستند على العناصر الثانوية، مقدراً بـــ in^4/ft (mm^4/m).

ويجب أن يتم إنقاص I_s، في الجيزان الشبكية والعناصر الأخرى ذات الجسد المكشوف إلى 15 %. ويجب ألا يتجاوز إجهاد الانعطاف الإجمالي، الناشئ عن الحمولات الميتة والحمولات الثقالية الحية وحمولات تجمع المياه، القيمة $0.80\ F_y$. حيث F_y هو إجهاد الخضوع المميز الأصغري للفولاذ.

10

صيغ الجسور وأكبال التعليق

Bridge and Suspension- Cable Formulas

تصميم مقاومة القص للجسور
Shear Strength Design For Bridges

اعتماداً على مواصفات **جمعية الزمالة الأميريكية لمكاتب الطرق والنقل الرسمية (AASHTO)** الخاصة بعامل الحمولة التصميمية (LFD) يمكن أن تُحسب السعة القصيّة مقدّرة بــ Kip (kN) من العلاقة:

$$V_u = 0.58\ F_y\ h\ t_w\ C$$

قيمة C، في العناصر المرنة بأجساد غير مقوّاة مع شرط $h/t_w < 150$ أو في الجيزان الرئيسية بأجساد مقوّاة مع a/h تتجاوز 3 أو $67{,}000\ (h/t_w)^2$، تُعطى بــ:

$$C = 1.0 \quad \text{عندما} \quad \frac{h}{t_w} < \beta$$

$$C = \frac{\beta}{h/t_w} \quad \text{عندما} \quad \beta \le \frac{h}{t_w} \le 1.25\beta$$

$$C = \frac{45{,}000k}{F_y(h/t_w)^2} \quad \text{عندما} \quad \frac{h}{t_w} > 1.25\beta$$

أمّا في حالة الجيزان (العوارض) الرئيسية بمقويات مستعرضة وبنسبة a/h أقل من 3 وأقل من $67{,}600\ (h/t_w)^2$، فإن السعة القصية تُعطى بــ:

$$V_u = 0.58F_y d t_w \left[C + \frac{1-C}{1.15\sqrt{1+(a/h)^2}} \right]$$

وتكون المقوّيات مطلوبة عندما يتجاوز القص قيمة V_u.

ولا تبقى إلا العودة إلى الفصل التاسع "صيغ تصميم عناصر الأبنية والمنشآت العامة" من أجل التعرُّف على الرموز المستخدمة في المعادلات السابقة.

تصميم الإجهاد المقبول في أعمدة الجسور

Allowable-Stress Design For Bridge Columns

تُحسب الإجهادات المسموحة في الأعمدة المحملة مركزياً من المعادلات اللاحقة، وذلك من خلال مواصفات أشتو (AASHTO) لتصميم الجسور:

عندما تكون Kl/r أقل من C_c:

$$F_a = \frac{F_y}{2.12}\left[1 - \frac{(kl/r)^2}{2C_c^2}\right]$$

عندما تكون Kl/r مساوية إلى أو أكبر من C_c:

$$F_a = \frac{\pi^2 E}{2.12(Kl/r)^2} = \frac{135.000}{(Kl/r)^2}$$

انظر الجدول 10.1

الجدول 10.1 صيغ الأعمدة الخاصة بتصميم الجسور

مقاومة الخضوع			الإجهاد المقبول .ksi (MPa)	
ksi	(MPa)	C_c	$Kl/r < C_c$	$Kl/r \geq C_c$
36	(248)	126.1	$16.98 - 0.00053\,(Kl/r)^2$	$\frac{135.000}{(Kl/r)^2}$
50	(345)	107.0	$23.58 - 0.00103\,(Kl/r)^2$	
90	(620)	79.8	$42.45 - 0.00333\,(Kl/r)^2$	
100	(689)	75.7	$47.17 - 0.00412\,(Kl/r)^2$	

عامل تصميم الحمولة والمقاومة العائد لأعمدة الجسور

Load-And-Resistance Factor Design For Bridge Columns

يجب أنْ يكون للعناصر المضغوطة المُصمَّمة عن طريق عامل تصميم الحمولة (LFD) مقاومةً عظمى، Kip ‏(kN)، تُعطى وفق:

$$P_u = 0.85\ A_s\ F_{cr}$$

حيث:

A_s = المساحة الخامية الفعالة لمقطع العمود العرضي، in^2 ‏(mm^2).

ومن أجل $KL_c / r \leq \sqrt{2\pi^2 E / F_y}$:

$$F_{cr} = F_y\left[1 - \frac{F_y}{4\pi^2 E}\left(\frac{KL_c}{r}\right)^2\right]$$

ومن أجل $KL_c / r > \sqrt{2\pi^2 E / F_y}$:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL_c / r)^2} = \frac{286{,}220}{(KL_c / r)^2}$$

حيث؛

F_{cr} = إجهاد التحنيب، Ksi ‏(MPa).

F_y = مقاومة خضوع الفولاذ، Ksi ‏(MPa).

k = عامل الطول الفعال في مستوي التحنيب.

L_c = طول العنصر بين المساند، in ‏(mm).

r = نصف قطر الدوران في مستوي التحنيب، in (mm).

E = معامل مرونة الفولاذ، Ksi (MPa).

يمكن تبسيط المعادلات السابقة بإدخال العامل Q:

$$Q = \left(\frac{KL_c}{r}\right)^2 \frac{F_y}{2\pi^2 E}$$

وبالتالي، يمكن إعادة كتابة المعادلات السابقة وفق ما سيبيَّن لاحقاً:

من أجل $Q \le 1.0$:

$$F_{cr} = \left(1 - \frac{Q}{2}\right) F_y$$

ومن أجل $Q > 1.0$:

$$F_{cr} = \frac{F_y}{2Q}$$

تصميم الإجهاد المقبول الخاص بجيزان الجسور

Allowable-Stress Design For Bridge Beams

تعطي أشتو (AASHTO) إجهاد (شد) الواحدة المقبول على الانعطاف بالعلاقة $F_b = 0.55\ F_y$. ونفس قيمة هذا الإجهاد تُسمح على الضغط عندما يكون جناح الضغط مسنوداً جانبياً على امتداد طوله كاملاً بغلاف من البيتون أو بوسيلة أخرى.

وفي حال كان جناح الضغط مستنداً جزئياً أو لا مستنداً خلال امتداده في الجسر، فإن إجهاد الانعطاف المقبول (الجدول 10.2)، مقدراً بـــ Ksi (MPa)، هو:

$$F_b = \left(\frac{5\times10^7 C_b}{S_{xc}}\right)\left(\frac{L_{yc}}{L}\right)\times\sqrt{\frac{0.772J}{I_{yc}}+9.87\left(\frac{d}{L}\right)^2} \leq 0.55F_y$$

حيث:

L = طول الجناح اللامسنود بين روابط الاستناد الجانبية المتضمنة مقوّيات مرفقية (زاويّة)، in (mm).

S_{xc} = معامل المقطع المتعلق بجناح الضغط، in^3 (mm^3).

I_{yc} = عزم عطالة جناح الضغط حول المحور الشاقولي في مستوي الجسد، (mm^4) in^4.

$J = 1/3\ (b_c t_c^3 + b_t t_t^3 + D\ t_w^3)$

b_c = عرض جناح الضغط، in (mm).

b_t = عرض جناح الشد، in (mm).

t_c = ثخانة جناح الضغط، in (mm).

t_t = ثخانة جناح الشد، in (mm).

t_w = ثخانة الجسد، in (mm).

D = عمق (تدلي) الجسد، in (mm).

d = عمق (تدلي) العنصر المروني، in (mm).

الجدول 10.2 إجهاد الانعطاف المقبول في جيزان الجسور المقوّاة.

F_y	F_b
36 (248)	20 (138)
50 (345)	27 (186)

يمكن حساب عامل تدرُّج العزم C_b عموماً من المعادلة اللاحقة. ويجب أن يؤخذ، على أي حال، مساوياً للواحدة في الأظفار غير المقوّاة والعناصر التي يكون فيها العزم ضمن جزء لا بأس به من طول هذه العناصر مساوياً إلى أو أكبر من أعظم عزميْ طرفي العنصر أو القطعة. بقيت الإشارة إلى أنه في حال استخدام صفائح التغطية فلابد أن يُحسب الإجهاد الستاتيكي المقبول في نقطة الطرف أو التوقف من المعادلة السابقة.

يمكن أن يُحسب عامل تدرج العزم من:

$$C_b = 1.75 + 1.05\frac{M_1}{M_2} + 0.3\left(\frac{M_1}{M_2}\right)^2 \leq 2.3$$

حيث:

M_1 = أصغر عزميْ نهايتيْ الجائز.

M_2 = أكبر عزميْ نهايتيْ الجائز.

وتكون الإشارة الجبرية لـــ M_1/M_2 موجبة في الانعطاف الثنائي الانحناء وسالبة في الانعطاف الأحادي الانحناء.

المقويات في الجيزان العرضية للجسور

Stiffeners On Bridge Girders

عزم العطالة الأصغري للمقوّي المستعرض (بالاتجاه العرضي) يجب أن يكون على الأقل، مقدراً بـــ in^4 (mm^4)، مساوياً إلى :

$$I = a_o t^3 J$$

حيث:

$$J = 2.5h^2 / a_o^2 - 2 \geq 0.5$$

h = المسافة الصافية (النظيفة) بين الجناحين، in (mm).

a_o = التباعد الفعلي بين المقوّيات، in (mm).

t = ثخانة الجسد، in (mm).

ويجب أن يؤخذ عزم العطالة حول خط مركز الجسد في المقوّيات المزدوجة. أمّا في المقوّيات المفردة فيجب أن يؤخذ عزم العطالة حول سطح التماس مع الجسد.

مساحة المقطع العرضي الخامي للمقويات المتوسطة (المتوضعة في الوسط) يجب أن تكون على الأقل:

$$A = \left[0.15BDt_w(1-C)\frac{V}{V_u} - 18t_w^2 \right] Y$$

حيث:

Y نسبة مقاومة خضوع صفيحة الجسد إلى مقاومة خضوع صفيحة التقوية.

B = 1.0 للمقويات المزدوجة وB = 1.8 لزوايا التقوية المفردة وB = 2.4 لصفائح التقوية المفردة.

C معرّفة في المقطع السابق "إجهاد التصميم المقبول في أعمدة الجسور".

V_u يجب أن تُحسب من معادلات المقطع السابق "تصميم مقاومة القص في الجسور".

عرض المقوّي المُستعرِض المتوسط، مثل الصفيحة أو القائمة الأساسية من زاوية مقوية، يجب أن يكون على الأقل 2 إنش (50.8 mm) زائد $\frac{1}{30}$ من عمق (تدلي) الجائز العرضي، ويُفضَّل ألا يقل عن 1/4 عرض الجناح. والثخانة الأصغرية لهذا المقوي المستعرض هي $\frac{1}{16}$ من عرضه.

المقوّيات الطولانيّة

يجب أن توضع هذه المقويات مع مثبتات مركز ثقلها يبتعد بمقدار h/5 من قدم الاستناد أو من الوجه الداخلي لجناح الضغط. ويجب أن يكون عزم العطالة، مقدراً بـ in^4 (mm^4)، على الأقل:

$$I = ht^3\left(2.4\frac{a_o^2}{h^2} - 0.13\right)$$

حيث:

a_o = المسافة الفعلية بين المقويات المستعرضة، in (mm).

t = ثخانة الجسد، in (mm).

يجب أن تكون ثخانة المقوّي على الأقل، مقدرة بـ in (mm)، مساوية إلى: $b\sqrt{f_b}/71.2$.

حيث: b عرض المقوي، in (mm). وf_b إجهاد ضغط انعطاف الجناح، Ksi (MPa).

ويجب ألا يتجاوز إجهاد الانعطاف في المقوّي ذلك الإجهاد المسموح لمادة المقوي.

الجيزان العرضية المختلطة في الجسور Hybrid Bridge Girders

يمكن أن يكون لهذه الجيزان أجنحة ذات مقاومة خضوع أكبر من مقاومة خضوع الجسد، وقد تكون هذه الجيزان مدموجة أو غير مدموجة مع البلاطة البيتونية، أو يمكن لهذه الجيزان أن تَستَخدِم صفيحة أرضية أورثوتروبية تعمل كجناح علوي.

حساب إجهادات الانعطاف والإجهادات المقبولة لا يختلف عموماً عن حسابها في الجيزان العرضية بمقاومة خضوع منتظمة. وعلى أي حال، قد يتجاوز إجهاد

الانعطاف في الجسد إجهاد الانعطاف المقبول إذا كان إجهاد الانعطاف المحسوب للجناح لم يتجاوز الإجهاد المقبول مضروباً بالقيمة:

$$R = 1 - \frac{\beta\psi(1-\alpha)^2(3-\psi+\psi\alpha)}{6+\beta\psi(3-\psi)}$$

حيث:

α = نسبة مقاومة خضوع الجسد على مقاومة خضوع الجناح.

ψ = المسافة من الحافة الخارجية للجناح المشدود أو من الجناح السفلي للعارضة الأرضية الأورثوتروبية إلى المحور المحايد مقسومة على عمق المقطع الفولاذي.

β = نسبة مساحة الجسد على مساحة جناح الشد أو الجناح السفلي لعارضة الجسر الأورثوتروبية.

عامل تصميم الحمولة في جيزان الجسور

Load-Factor Design For Bridge Beams

ثمة ثلاثة أنواع عامة من العناصر تؤخذ بالاعتبار بما يخص عامل تصميم الحمولة (LFD) في الجيزان المتناظرة المقطع، وهي: العناصر ذات المقاطع المرصوصة والمقاطع المقوّاة غير المرصوصة والمقاطع غير المقوّاة. وتعتمد المقاومة العظمى لكل نوع (العزم، in.Kip (mm.kN)) على أبعاد العنصر والطول غير المقوّى وكذا على القص المُطبَّق والحمولة المحورية (الجدول 10.3).

تُطبَّق المقاومات العظمى المعطاة بالصيغ الواردة في الجدول 10.3 فقط عندما لا يتجاوز الإجهاد المحوري الأعظم القيمة $0.15\ F_yA$، حيث A مساحة مقطع العنصر. أما الرموز المستخدمة في الجدول 10.3 فهي معرّفة وفق التالي:

F_y = مقاومة خضوع الفولاذ، Ksi (MPa).

Z = معامل المقطع اللدن، in^3 (mm^3).

S = معامل المقطع، in^3 (mm^3).

b' = عرض بروز الجناح، in (mm).

d = عمق المقطع، in (mm).

h = المسافة اللامسنودة بين الأجنحة، in (mm).

M_l = العزم الأصغر في أطراف الطول اللامقوّى للعنصر، in.Kip (mm.kN).

$M_u = F_y Z$

M_l/M_u موجبة في حالة الانعطاف الأُحادي الانحناء.

التحميل على السطوح المدلفنة (اللاموثوقة)

Bearing On Milled Surfaces

تُحدِّد أشتو (AASHTO)، في تصميم الطرق العامة (highway)، إجهاد التحميل المقبول على قطع التقوية المدلفنة والأجزاء الفولاذية الأخرى الموجودة في حالة تماس مع الحمولات، بـــ $F_p = 0.80\ F_u$. أمّا إجهادات التحميل المقبولة على الدُّسر فهي معطاة في الجدول 10.4.

إجهاد التحميل المقبول الخاص بتمدُّد الدلافين وصفائح الاستناد الاهتزازية المستخدمة في الجسور يعتمد على نقطة الخضوع في حالة الشد F_y لفولاذ الدلفين أو فولاذ القاعدة، أيهما أصغر. ويكون الإجهاد المقبول في الأقطار التي تصل إلى 25 إنش (635 mm)، مقدراً بـــ Kip/linear in (kN/mm)، مساوياً إلى:

$$p = \frac{F_y - 13}{20} 0.6d$$

الجدول 10.3 معايير التصميم للمقاطع المرونية المتناظرة العائدة لعامل تصميم الحمولة في الجسور

نوع المقطع	مقاومة الانعطاف العظمى، M_u in.kip (mm.kN)	سماكة الجناح الصغرى، t_f in (mm)	سماكة الجسد الصغرى، t_w in (mm)	الطول الأعظمي غير المقوّى، l_b in (mm)
مرصوص	$F_y Z$	$\frac{b'\sqrt{F_y}}{65.0}$	$\frac{d\sqrt{F_y}}{608}$	$\frac{[3600-2200(M_l/M_u)]r_y}{F_y}$
مقوّى وغير مرصوص	$F_y S$	$\frac{b'\sqrt{F_y}}{69.6}$	$\frac{h}{150}$	$\frac{20{,}000A_f}{F_y d}$
غير مقوّى				انظر مواصفات أشتو – AASHTO

يمكن استخدام التوسط (الاستيفاء) الداخلي الخطي بين عزميْ المقطع المرصوص والمقطع المقوّى اللامرصوص لوضع المعايير الوسطى بينهما، ويستثنى من ذلك الحالة $t_w \le d\sqrt{F_y}/608$ حيث يجب أن يتم الحفاظ على السماكة t_w، كما ويضاف إلى ذلك التالي: عندما تتجاوز b'/t_f و d/t_w، في المقاطع المرصوصة، 75 % من الحدود المخصصة لهذه النسب، عندئذ تُطبّق معادلة تبادل الفعل التالية:

$$\frac{d}{t_w} + 9.35\frac{b'}{t_f} \le \frac{1064}{\sqrt{F_{yf}}}$$

حيث: F_{yf}: مقاومة خضوع الجناح، Ksi (MPa).

t_w: سماكة الجسد، in (mm).

t_f: سماكة الجناح، in (mm)

الجدول 10.4 إجهادات التحميل المقبولة على الدُّسر*

		جسور	
	مباني	دسُر تخضع لدوران	دسُر لا تخضع لدوران
F_y	$F_p = 0.90\ F_y$	$F_p = 0.40\ F_y$	$F_p = 0.80\ F_y$
36 (248)	33 (227)	14 (96)	29 (199)
50 (344)	45 (310)	20 (137)	40 (225)

* الواحدة بـ Ksi (MPa)

أما من أجل الأقطار التي تبدأ من 25 إلى 125 إنش (635 إلى 3175 ميليمتر)، فيكون الإجهاد المقبول:

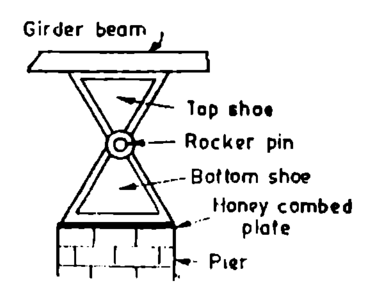
$$p = \frac{F_y - 13}{20} 3\sqrt{d}$$

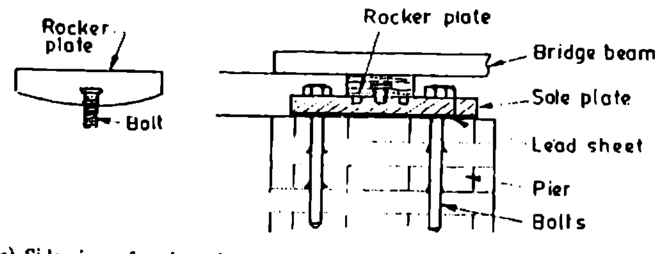
حيث:

d - قطر الدلفين أو صفيحة الاستناد الاهتزازية، in (mm).

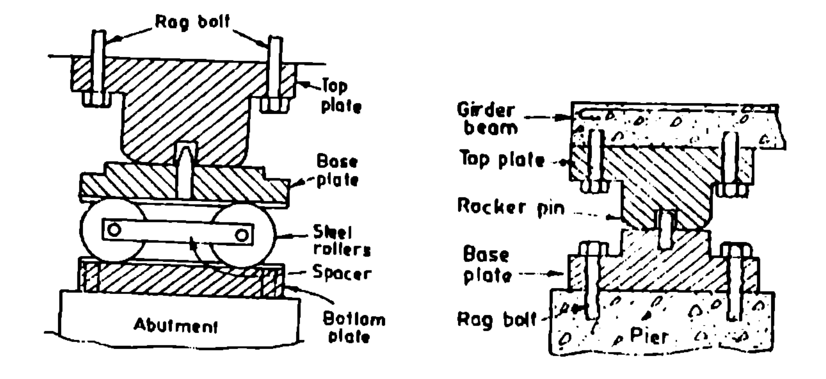
نماذج من سطوح تحميل الجسور

بعض اشكال الاستناد

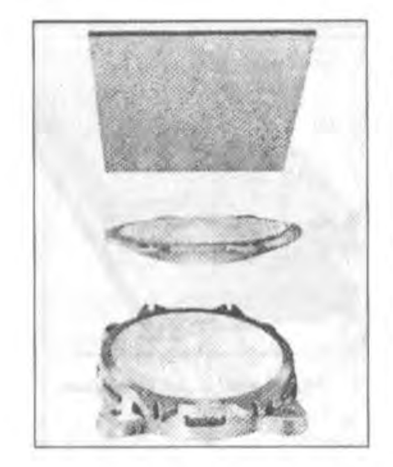




(*a*) Side view of rocker plate. (*b*) Plate bearing.



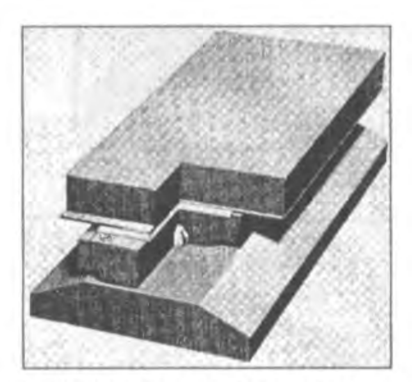
صفيحة تحميل ممانعة



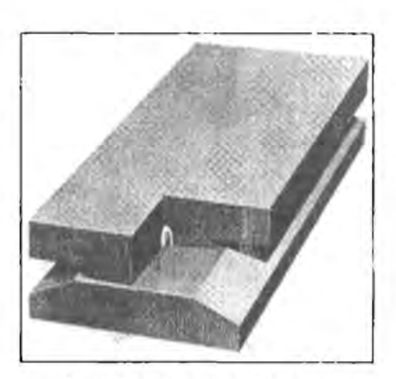
صفيحة تحميل كروية (حرة الإنزلاق)



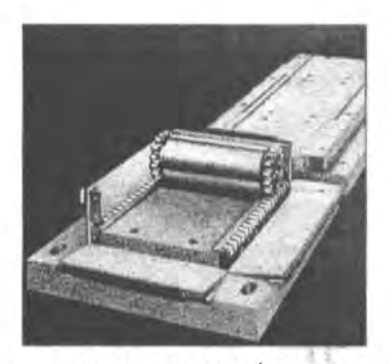
صفيحة تحميل كروية (موجهة)



صفيحة تحميل ذراعية (حرة الإنزلاق)



صفحه تحمل دراعيه (ثابته)

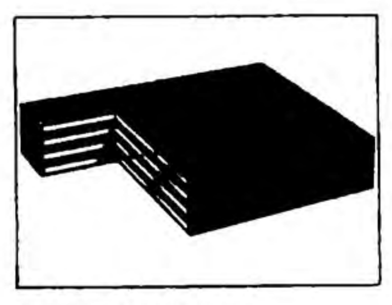


دلعين تحميل أسطواني ذو قدرة تحميل عاليه

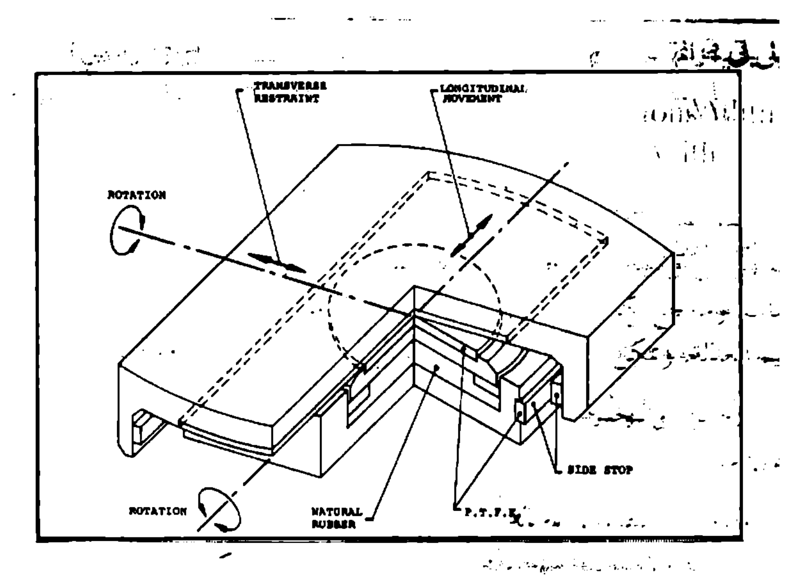
شكل نموذج لصفيحة تحميل



أسطوانه التحمل العائمة



صفيحة التحمل



سطح تحميل إسطواني عائم (موّجه)

مُثبِّتات الجسر Bridge Fasteners

تُحدِّدُ أشتو (AASHTO) بدقة إجهادات تشغيل البراغي في الجسور. وتكون وصلات التحميل النموذجية ذات البراغي العالية المقاومة مقتصرة على العناصر في حالة الضغط والعناصر الثانوية. وإجهاد التحميل المقبول:

$$F_p = 1.35\ F_u$$

حيث:

F_p = إجهاد التحميل المقبول، Ksi (MPa).

F_u = مقاومة الشد للجزء الموصول، Ksi (MPa) (أو وفق ما هو مُحدد بالتحميل المقبول على المثبتات).

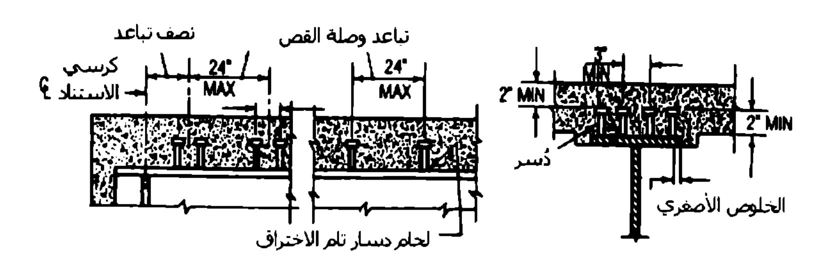
فإجهاد التحميل المقبول على البراغي A 307 هو 20 Ksi (137.8 MPa) وعلى براشيم الفولاذ الإنشائي، 40 Ksi (275.6 MPa).

الإنشاء المختلط في جسور الطرق العامة

Composite Construction In Highway Bridges

يجب أن تكون الوصلات القصيّة بين جيزان الفولاذ الرئيسية والبلاطة البيتونية في الإنشاء المختلط في جسر الطريق العام (highway bridge) قادرة على مقاومة كلا الحركتين الأفقية والشاقولية بين البيتون والفولاذ. ويكون التباعد الأعظمي للوصلات القصية عموماً 24 إنش (609.6 mm)، إلا أنه يمكن استخدام تباعد أعرض فوق المساند الداخلية لتجنّب إجهاد أجزاء جناح الشد على نحو مفرط (الشكل 10.1).

ويجب أن يكون عمق الغطاء البيتوني النظيف فوق الوصلات القصية على الأقل 2 إنش (50.8 mm) كما ويجب أن يمتد على الأقل بـــ 2 إنش (50.8 mm) فوق قاع البلاطة.



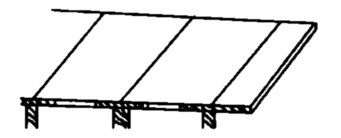
الشكل 10.1 الخطوة العظمى لتباعد دُسر الوصلات القصيّة في الجيزان المختلطة:
1 in (25.4 mm), 2 in (50.8 mm), 3 in (76.2 mm), 24 in (609.6 mm)

نسبة المجاز/العمق

غالباً ما يُحبَّذ في الجيزان المختلطة الخاصة بالجسور، عدم تجاوز نسبة المجاز إلى عمق الجائز الفولاذي، المقدار 30. وكذا عدم تجاوز نسبة المجاز إلى عمق الجائز الفولاذي زائد ثخانة البلاطة، المقدار 25.

العرض الفعال للبلاطات

العرض الفعّال المفترض أو المعطى للجناح البيتوني، في الجائز الرئيسي المختلط الداخلي، يجب ألا يتجاوز أيّاً من القيم التالية:



1. ربع مجاز الجائز الممتد بين مركزيْ الاستناد.
2. المسافة بين خطيْ مركزيْ جائزين رئيسيين متجاورين.
3. اثنتا عشرة مرة الثخانة الأصغرية للبلاطة.

بما يَخصُّ الجائز المرفق ببلاطة على طرف واحد فقط منه، في هذه الحالة يجب ألا يتجاوز العرض الفعّال للبلاطة هذه أيّاً من القيم التالية:

1. $\frac{1}{12}$ من مجاز الجائز الممتد بين مركزيْ الاستناد.
2. نصف المسافة المقاسة من خط مركز الجائز الرئيسي المجاور.
3. ست مرات الثخانة الأصغرية للبلاطة.

إجهادات الانعطاف

تعتمد الإجهادات، في الجيزان المختلطة العائدة للجسور، على إذا ما كانت العناصر مُدَعَّمة أمْ لا؛ فهذه الإجهادات تمّ تعيينها بالنسبة للجيزان في الأبنية (انظر "الإنشاء المختلَط" في الفصل التاسع "صيغ تصميم عناصر الأبنية والمنشآت")، ماعدا تلك الإجهادات في الفولاذ التي قد لا تتجاوز $0.55\ F_y$. (انظر المعادلات اللاحقة.)

فيما يَخُصُّ العناصر اللامُدعَّمة:

$$f_s = \frac{M_D}{S_s} + \frac{M_L}{S_{tr}} \leq 0.55F_y$$

حيث:

F_y = مقاومة الخضوع، ksi (MPa).

وبما يخص العناصر المدعمة:

$$f_s = \frac{M_D + M_L}{S_{tr}} \le 0.55F_y$$

حيث:

f_s = الإجهاد في الفولاذ، Ksi (MPa).

M_D = عزم الحمولة الميتة، in.Kip (kN.mm).

M_L = عزم الحمولة الحية، in.Kip (kN.mm)

S_s = معامل مقطع الجائز الفولاذي، in^3 (mm^3).

S_{tr} = معامل مقطع المقطع المختلط المُحوَّل (المكافئ)، in^3 (mm^3).

مجال تراوح القص

تُصمَّم الوصلات القصيّة في الجسور لتتحمل الكلل (تأثير الحمولات المتكررة) ومن ثم تُختَبَر على المقاومة الحدية. فيُحسَب مجال القص الأفقي العائد للكلل أو التعب، من:

$$S_r = \frac{V_r Q}{I}$$

حيث:

S_r = مجال القص الأفقي عند منطقة اتصال البلاطة والجائز في النقطة المُعتبرة، Kip/linear in (kN/linear mm).

V_r = مجال تراوح القص (الفرق بين القص الأعظمي والأصغري في النقطة المعتبرة) الناشئ عن الحمولة والرص، Kip (kN).

Q = العزم الستاتيكي للمساحة البيتونية المحوَّلة المضغوطة حول المحور المحايد للمقطع المحوَّل، in^3 (mm^3).

I = عزم عطالة المقطع المُحوَّل، in^4 (mm^4).

المساحة المحوَّلة هي المساحة البيتونية الفعلية مقسومة على n (الجدول 10.5).

ويُعطى المجال المسموح للقص الأفقي Z_r العائد لوصلة مستقلة، مقدراً بـ (kN) Kip، بالمعادلتين اللاحقتين المعتمدتين على الوصلة المستخدمة.

الجدول 10.5 نسبة عاملي المرونة للفولاذ والبيتون الخاصة بالجسور

f'_c من أجل البيتون	$n = \frac{E_s}{E_c}$
2.0 - 2.3	11
2.4 - 2.8	10
2.9 - 3.5	9
3.6 - 4.5	8
4.6 - 5.9	7
6.0 (وما فوقها)	6

فمن أجل وصلات الجيزان التي على شكل قناة، بشريطيْ لحام مقطعاهما مثلثان مليئان 3/16 إنش (4.76 mm) على امتداد الجهة الأمامية والخلفية لمرتكز القناة، يكون Z_r:

$$Z_r = Bw$$

حيث:

w = طول القناة في الاتجاه المستعرض على جناح الجائز الرئيسي، in (mm).

B = متحوّل دوري = 4.0 من أجل 100,000 دورة و3.0 من أجل 500,000 دورة و2.4 من أجل 2 مليون دورة و2.1 من أجل عدد دورات تفوق 2 مليون.

أما بما يخص وصلات الدُسر الغليظة الملحومة (ذات نسبة علو على قطر؛ $H/d \geq 4$)، فيكون Z_r:

$$Z_r = \alpha d^2$$

حيث:

d = قطر الدسار، in (mm).

α = متحوّل دوري = 13.0 من أجل 100,000 دورة و10.6 من أجل 500,000 دورة و7.85 من أجل 2 مليون دورة و5.5 من أجل عدد دورات تفوق 2 مليون.

يتم تعيين خطوة التباعد لوصلات القص عن طريق تقسيم المجال المقبول للقص الأفقي لجميع الوصلات (الروابط) في أحد المقاطع Z_r على المجال الأفقي للقص S_r المقدر بـ Kip/linear in (kN/linear mm).

عدد الروابط* في الجسور
Number Of Connectors In Bridges

تُختبر المقاومة الحدّية للروابط القصية بحساب عدد الروابط المطلوبة، من:

$$N = \frac{P}{\phi S_u}$$

---

* نكرر أن المقصود بالروابط هو الدُسر، البراغي، البراشيم، ... الخ

حيث:

N = عدد الروابط القصيّة بين العزم الموجب الأعظمي والمساند الطرفية.

S_u = المقاومة الحدية للرابط القصّي، Kip (kN).

[انظر المعادلات (10.1) و(10.2) التي ستأتي وبيانات أشتو ـــ AASHTO]

ϕ = عامل تخفيض = 0.85

P = القوة المؤثرة في البلاطة، Kip (kN).

تكون P في نقاط العزوم الموجبة الأعظمية أصغر من P_1 وP_2 المحسوبتان من:

$$P_1 = A_s F_y$$

$$P_2 = 0.85\ f_c^{'} A_c$$

حيث:

A_c = مساحة البيتون الفعّالة، in^2 (mm^2).

$f_c^{'}$ = مقاومة ضغط البيتون في اليوم 28، Ksi (MPa).

A_s = المساحة الإجمالية لمقطع الفولاذ، in^2 (mm^2).

F_y = مقاومة خضوع الفولاذ، Ksi (MPa).

عدد الروابط المطلوبة بين نقطتي العزم الموجب الأعظمي والعزم السالب الأعظمي المجاور يجب أن يساوي أو يتجاوز N_2 المعطاة بالعلاقة:

$$N_2 = \frac{P + P_3}{\phi S_u}$$

وتُحسب القوة المؤثرة في البلاطة P_3، في نقاط العزوم السالبة الأعظمية، من:

$$P_3 = A_{sr} F_{yr}$$

حيث:

A_{sr} = مساحة التسليح الطولاني ضمن الجناح الفعّال، in^2 (mm^2).

F_{yr} = مقاومة خضوع فولاذ التسليح، Ksi (MPa).

مقاومة القص الحدية للروابط في الجسور

من أجل الأقنية:

$$S_u = 17.4\left(h + \frac{t}{2}\right)w\sqrt{f'_c} \qquad (10.1)$$

حيث:

h = الثخانة الوسطية لجناح القناة، in (mm).

t = ثخانة جسد القناة، in (mm).

w = طول القناة، in (mm).

ومن أجل الدُّسر الملحومة ($H/d \geq 4$ in (101:6 mm)):

$$S_u = 0.4d^2\sqrt{f'_c E_c} \qquad (10.2)$$

إجهاد التصميم المقبول على القص في الجسور

Allowable-Stress Design For Shear In Bridges

يمكن أن يُحسب إجهاد القص المقبول، بالاعتماد على مواصفات أشتو (AASHTO) لجسور الطرق العامة، من العلاقة:

$$F_v = \frac{F_y}{3} C \le \frac{F_y}{3}$$

ومن أجل العناصر المرونية بأجساد غير مقوّاة وبنسبة $h/t_w < 150$ أو من أجل الجيزان الرئيسية بأجساد مقوّاة وبنسبة a/h تتجاوز 3 و$67,600\ (h/t_w)^2$، يكون:

$C = 1.0$ عندما $\frac{h}{t_w} \le \beta$

$C = \frac{\beta}{h/t_w}$ عندما $\beta < \frac{h}{t_w} < 1.25\beta$

$C = \frac{45,000k}{F_y (h/t_w)^2}$ عندما $\frac{h}{t_w} > 1.25\beta$

$k = 5$ إذا كانت النسبة $\frac{a}{h}$ تتجاوز 3 أو $67,600\left(\frac{h}{t_w}\right)^2$ أو إذا لم تكن المقويات مطلوبة، وإلا $k = 5 + \frac{5}{(a/h)^2}$.

$$\beta = 190\sqrt{\frac{k}{F_y}}$$

أما إجهاد القص المقبول، في الجيزان الرئيسية بمقويات مستعرضة وبنسبة a/h أقل من 3 ومن $67,600\ (h/t_w)^2$، فيعطى بالعلاقة:

$$F_v = \frac{F_y}{3}\left[C + \frac{1-C}{1.15\sqrt{1+(a/h)^2}}\right]$$

وتكون المقوّيات مطلوبة عندما يتجاوز القص القيمة F_v.

النسب العظمى للعرض على الثخانة في عناصر الضغط العائدة لجسور الطرقات العامة

Maximum Width/Thickness Ratios For Compression Elements For Highway Bridges

يسرد الجدول 10.6 عدداً من الصيغ الخاصة بالنسب العظمى للعرض إلى الثخانة لعناصر الضغط في جسور الطرق العامة. وهذه الصيغ مُتاحة لتصميم جسر طريق عام.

الجدول 10.6 النسب العظمى للعرض إلى السماكة b/t[a] لعناصر الضغط في جسور الطرق العامة[b]

وصف العنصر	عامل تصميم الحمولة والمقاومة[c] مرصوص	غير مرصوص[d]
بروز الجناح من جيزان على شكل I مدلفنة أو مُصنّعة.	$\frac{65}{\sqrt{F_y}}$	$\frac{70}{\sqrt{F_y}}$[e]
أحساد في حالة انضغاط مروني	$\frac{608}{\sqrt{F_y}}$	150

وصف العنصر	تصميم الإجهاد المقبول[f] $f_a < 0.44\,F_y$	$f_u = 0.44F_y$ ، $F_y = 50ksi(344.5MPa)$	$f_u = 0.44F_y$ ، $F_y = 36ksi(248MPa)$
صفائح مستندة في طرف واحد وأضلاع زاوية ظاهرة (بارزة)			
في العناصر الرئيسية	$\frac{51}{\sqrt{f_a}} \le 12$	11	12
في عناصر التقوية والعناصر الثانوية الأخرى	$\frac{51}{\sqrt{f_a}} \le 16$	11	12
صفائح مستندة على حافتين أو أحساد أشكال صندوقية[g]	$\frac{126}{\sqrt{f_a}} \le 45$	32	27

الجدول 10.6 /تابع/ النسب العظمى للعرض إلى السماكة b/t[a] لعناصر الضغط في جسور الطرق العامة[b]

وصف العنصر	عامل تصميم الحمولة والمقاومة[c] مرصوص	غير مرصوص[d]	
صفائح تغطية صلبة مستندة على حافتين أو أحساد صلبة[h]	$\frac{158}{\sqrt{f_a}} \leq 50$	34	40
صفائح تغطية مثقبة مستندة على حافتين خاصة بأشكال صندوقية	$\frac{190}{\sqrt{f_a}} \leq 55$	41	48

a b = عرض العنصر أو الجزء البارز؛ t = السماكة. النقطة الاستناد هي الخط الداخلي للمثبتات أو لأشرطة اللحام التي تربط الصفيحة بالقطعة الرئيسية أو جذر الجناح في الأشكال المدلفنة. في عامل تصميم مقاومة الحمولة (LRFD) بالنسبة لأحساد المقاطع اللامرصوصة، تؤخذ $b = d$ حيث d عمق الجائز؛ وبالنسبة للمقاطع اللامرصوصة، $b = D$، حيث D المسافة اللامسنودة بين مركبتي الجناحين.

b وفق ما هو مطلوب في أشتو (AASHTO) "المواصفات النظامية الخاصة بجسور الطرقات العامة". كذلك فإن المواصفات تعطي المحظورات والتحديدات في عناصر الجيزان المصفحة.

c F_y = إجهاد الخضوع الأصغري المميز للفولاذ، Ksi (MPa).

d إن العناصر بنسب عرض على سماكة تتجاوز حدود العناصر اللامرصوصة يجب أن تصمَّم كعناصر نحيفة.

e عندما يكون عزم الانعطاف الأعظمي M أقل من العزم المقاوم M_u أو بالأصح أقل من مقاومة العزم M_u، فإن النسبة b/t الواردة في الجدول يمكن أن تُضرَب بـ $\sqrt{M_u / M}$.

f f_a = إجهاد الضغط المحوري المحسوب، Ksi (MPa).

g للأشكال الصندوقية التي تتألف من صفائح رئيسية أو مقاطع مدلفنة أو قطع مُركَّبة مع صفائح تغطية.

h للأحساد التي تربط الأعضاء الرئيسية أو القطع العائدة للأشكال الصندوقية أو الأشكال H.

أكبال التعليق Suspension Cables

قوة شد أكبال تعليق على شكل قطع مكافئ، وأطوالها

غالباً ما تستخدم الأكبال الفولاذية في الجسور المعلقة لتتلقى حمولات الطريق الأفقية (الشكل 10.2). وتتخذ الأكبال، بحمولة موزعة بانتظام على الامتداد الأفقي للجسر، شكل قوس من قطع مكافئ. إذن فقوة الشد في منتصف المجاز:

$$H = \frac{wL^2}{8d}$$

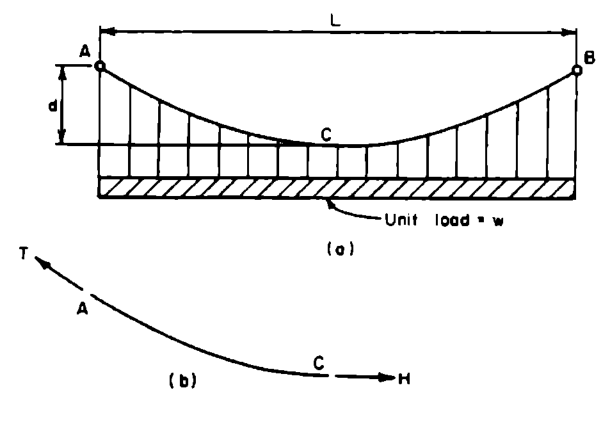
حيث؛

H = الشد في منتصف المجاز، Kip (N).

w = الحمولة على واحدة المسافة الأفقية، Kip/ft (kN/m).

L = طول المجاز، ft (m).

d = مسافة ارتخاء (تدلي) الكبل، ft (m). (انظر الشكل 10.2).



الشكل 10.2 كبل تدعيم حمولة موزعة بانتظام على الامتداد الأفقي.

تُعطى قوة الشد عند نقاط استناد الكبل بـــ:

$$T = \left[H^2 + \left(\frac{wL}{2} \right)^2 \right]^{0.5}$$

حيث:

T = الشد عند نقاط الاستناد، Kip (N).

أما الرموز الباقية فهي كما عُرِّفت من ذي قبل.

يمكن أن يُحسب طول الكبل S، عندما تكون النسبة d/L مساوية إلى 1/20 أو أقل، بصورة تقريبية من:

$$S = L + \frac{8d^2}{3L}$$

حيث:

S = طول الكبل، ft (m).

شكل منحني ارتخاء الكبل والمسافة بين المساند

إن كبلاً من مقطع عرضي منتظم يحمل وزنه الذاتي فقط سوف يأخذ شكل المنحني المعروف بمنحني السلسلة . وباستخدام نفس الترميز السابق، يتم إيجاد وسيط منحني السلسلة C من:

---

* تُعطى المعادلة العامة لمنحني السلسلة (منحني ارتخاء الكبل) بـــ:

$$y = \frac{C}{2}\left[e^{(x-\alpha)/c} + e^{-(x-\alpha)/c}\right] = C\,ch\,\frac{x-\alpha}{C}$$

حيث تتعين قيمتا الثابتين الاختياريين α، C من شروط تثبيت الطرفين. كان حاليليو يعتبر أن شكل الاتزان هذا هو قطع مكافئ وقد صحح فيما بعد هيوجنس خطأ حاليليو. (المعدّ).

$$d + c = \frac{T}{w}$$

إذن:

$$c = \left[(d + C)^2 - \left(\frac{S}{2} \right)^2 \right]^{0.5}$$

(مسافة ارتخاء الكبل) $S_{ag} = d + c$ ft (m)

وبالتالي يكون طول المجاز: $L = 2c$، بأخذ نفس الرموز السابقة.

العلاقات العامة للأكبال المعلقة
General Relations For Suspension Cables

منحني ارتخاء الكبل (Catenary)

طول منحني الارتخاء S لكبل بسيط (الشكل 10.3) ذي حمولة q_o بواحدة الطول للكبل مقاساً من النقطة المنخفضة للكبل مع أخذ الرموز المعطاة في الشكل 10.3 يساوي:

$$s = \frac{H}{q_o} \text{Sinh} \frac{q_o x}{H} = x + \frac{1}{3!} \left(\frac{q_o}{H} \right)^2 x^3 + \ldots$$

ويكون الشد في أي نقطة:

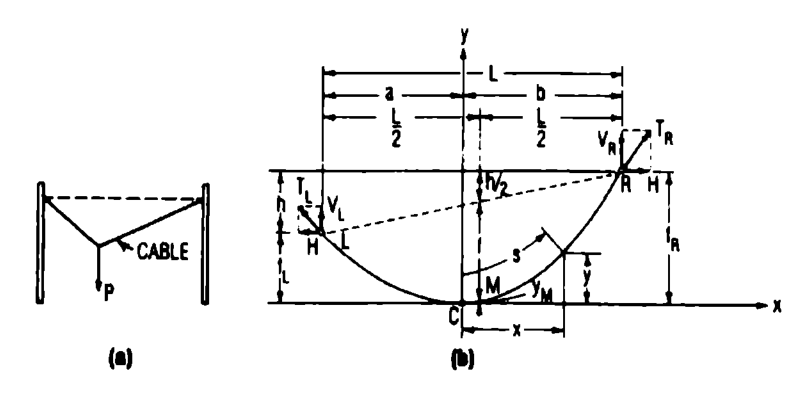
$$T = \sqrt{H^2 + q_o^2 s^2} = H + q_o y$$

وتكون المسافة من النقطة المنخفضة C إلى المسند اليساري:

$$a = \frac{H}{q_o} \text{Cosh}^{-1} \left(\frac{q_o}{H} f_L + 1 \right)$$

حيث:

f_L = المسافة الشاقولية من C إلى L، ft ‏(m).



الشكل 10.3 أكبال بسيطة. (a) شكل الكبل ذي الحمولة المركزة (b) شكل الكبل بمساند على سويتين مختلفتين.

والمسافة من C إلى المسند اليميني R:

$$b = \frac{H}{q_o} \text{Cosh}^{-1}\left(\frac{q_o}{H} f_R + 1\right)$$

حيث:

f_R = المسافة الشاقولية من C إلى R.

بإعطاء مسافيْ تدلي منحني الارتخاء تحت تأثير الحمولة الشاقولية الموزعة q_o، يمكن عندئذٍ حساب المركبة الأفقية لشد الكبل H من:

$$\frac{q_o l}{H} = \text{Cosh}^{-1}\left(\frac{q_o f_L}{H} + 1\right) + \text{Cosh}^{-1}\left(\frac{q_o f_R}{H} + 1\right)$$

حيث:

l = المجاز، أو المسافة الأفقية بين المسندين L و b+a = R.

تُحل هذه المعادلة عادة بالتجريب. القيمة التقديرية الأولى لـــ H التي تستبدل في الطرف الأيمن من المعادلة يمكن أن يتم الحصول عليها بتقريب منحني الارتخاء إلى منحني قطع مكافئ. يمكن أن تُحسب المركبات الشاقولية لرديْ الفعل عند المساند من:

$$R_L = H \operatorname{Sin} h \frac{q_o a}{H} \quad , \quad R_R = H \operatorname{Sin} h \frac{q_o b}{H}$$

منحني القطع المكافئ

الحمولات الحية المنتظمة الشاقولية والحمولات الميتة المنتظمة الشاقولية باستثناء وزن الكبل يمكن أن تُعامل عموماً كحمولات موزعة بانتظام فوق المسقط الأفقي للكبل. وتحت تأثير مثل هذه التحميلات، يأخذ الكبل شكل القطع المكافئ.

بفرض أن مبدأ الإحداثيات عند النقطة المنخفضة C (الشكل 10.3). فإذا كانت w_0 الحمولة بالقدم (بالمتر) أفقياً، فإن معادلة القطع المكافئ لمنحني الكبل:

$$y = \frac{w_o x^2}{2H}$$

والمسافة من النقطة المنخفضة C إلى المسند الأيسر L هي:

$$a = \frac{l}{2} - \frac{Hh}{w_o l}$$

حيث:

l = المجاز أو المسافة الأفقية بين المسندين L و b + a = R.

h = المسافة الشاقولية بين المسندين.

المسافة من النقطة المنخفضة C إلى المسند الأيمن R هي:

$$b = \frac{l}{2} + \frac{Hh}{w_0 l}$$

المساند المتوضعة على سويات مختلفة

يمكن حساب المركبة الأفقية لشد الكبل H من:

$$H = \frac{w_0 l^2}{h^2}\left(f_R - \frac{h}{2} \pm \sqrt{f_L f_R}\right) = \frac{w_0 l^2}{8f}$$

حيث:

f_L = المسافة الشاقولية من C إلى L.

f_R = المسافة الشاقولية من C إلى R.

f = مسافة تدلي (ارتخاء) الكبل المقاسة شاقولياً بدءاً من الوتر L_R عند منتصف المسافة بين المسندين (عند $x = Hh/w_0 l$).

كما هو مُحدَّد في الشكل 10.3b:

$$f = f_L + \frac{h}{2} - y_M$$

حيث:

$y_M = Hh^2/2w_0 l^2$.

ويجب أن تستخدم الإشارة السالبة لـ y_M عندما تكون النقطة المنخفضة C واقعة بين المسندين. فإن لم تكن ذروة القطع المكافئ C واقعة بين L و R فيجب أن تستخدم الإشارة الموجبة.

يمكن أن تُحسب المركبات الشاقولية لردود الأفعال عند المساند من:

$$V_L = w_o a = \frac{w_o l}{2} - \frac{Hh}{l}$$

$$V_R = w_o b = \frac{w_o l}{2} + \frac{Hh}{l}$$

الشد عند أي نقطة:

$$T = \sqrt{H^2 + w_o^2 x^2}$$

طول قوس القطع المكافئ RC:

$$L_{RC} = \frac{b}{2}\sqrt{1+\left(\frac{w_o b}{H}\right)^2} + \frac{H}{2w_o}\operatorname{Sin h}\frac{w_o b}{H}$$

$$= b + \frac{1}{6}\left(\frac{w_o}{H}\right)^2 b^3 + \ldots\ldots$$

وطول قوس القطع المكافئ LC:

$$L_{LC} = \frac{a}{2}\sqrt{1+\left(\frac{w_o a}{H}\right)^2} + \frac{H}{2w_o}\operatorname{Sin h}\frac{w_o a}{H}$$

$$= a + \frac{1}{6}\left(\frac{w_o}{H}\right)^2 a^3 + \ldots\ldots$$

المساند على نفس السوية

يكون في هذه الحالة: $f_L = f_R = f$ ، $h = o$ ، $a = b = l/2$.

ويمكن أن تحسب المركبة الأفقية لشد الكبل H من:

$$H = \frac{w_o l^2}{8f}$$

والمركبات الشاقولية لردود الأفعال عند المساند:

$$V_L = V_R = \frac{w_o l}{2}$$

ويحدث الشد الأعظمي عند المساند ويساوي:

$$T_L = T_R = \frac{w_o l}{2}\sqrt{1+\frac{l^2}{16f^2}}$$

وطول الكبل بين المسندين:

$$L = \frac{1}{2}\sqrt{1+\left(\frac{w_o l}{2H}\right)^2} + \frac{H}{w_o}\mathrm{Sin\,h}\frac{w_o l}{2H}$$

$$= l\left(1+\frac{8}{3}\frac{f^2}{l^2}-\frac{32}{5}\frac{f^4}{l^4}+\frac{256}{7}\frac{f^6}{l^6}+\ldots\right)$$

في حال تمَ تطبيق حمولة إضافية موزعة بانتظام على الكبل المكافئي، يكون التغيّر في مسافة الارتخاء يساوي على نحوٍ تقريبي إلى:

$$\Delta f = \frac{15}{16}\frac{l}{f}\frac{\Delta L}{5-24f^2/l^2}$$

وبما يخص ارتفاع درجة الحرارة t، يكون التغيُّر في مسافة الارتخاء (تدلي الكبل الشاقولي) مساوياً تقريباً:

$$\Delta f = \frac{15}{16}\frac{l^2 ct}{f(5-24f^2/l^2)}\left(1+\frac{8}{3}\frac{f^2}{l^2}\right)$$

حيث:

c = أمثال التمدد الحراري.

تساوي الاستطالة المرونية للكبل المكافئي على نحوٍ تقريبي إلى:

$$\Delta L = \frac{Hl}{AE}\left(1 + \frac{16}{3}\frac{f^2}{l^2}\right)$$

حيث:

A = مساحة المقطع العرضي للكبل.

E = معامل المرونة لفولاذ الكبل.

H = المركبة الأفقية للشد في الكبل.

فإذا كان التغيُّر المقابل للارتخاء صغيراً بحيث أن تأثيره على H يكون مهملاً، فيمكن لهذا التغيُّر أن يُحسب من:

$$\Delta f = \frac{15}{16}\frac{Hl^2}{AEf}\frac{1 + 16f^2/3l^2}{5 - 24f^2/l^2}$$

في الحالة العامة للحمولة الشاقولية الميتة على الكبل، يُعطى الشكل الأولي للكبل بـــ:

$$y_D = \frac{M_D}{H_D}$$

حيث:

M_D = عزم انعطاف الحمولة الميتة الذي سينتج عن الحمولة في جائز بسيط.

H_D = المركبة الأفقية للشد الناشئ عن الحمولة الميتة.

أما في الحالة العامة للحمولة الشاقولية الحية على الكبل، يُعطى الشكل النهائي للكبل:

$$y_D + \delta = \frac{M_D + M_L}{H_D + H_L}$$

حيث:

δ = التغيُّر الشاقولي (التشوّه) للكبل الناشئ عن الحمولة الحية.

M_L = عزم انعطاف الحمولة الحية الذي سينتج عن الحمولة الحية في جائز بسيط.

H_L= الزيادة في المركبة الأفقية للشد الناشئ عن الحمولة الحية.

وبطرح العلاقتين السابقتين ينتج:

$$\delta = \frac{M_L - H_L y_D}{H_D + H_L}$$

إذا ما تمّ افتراض أن شكل الكبل يأخذ شكلَ قطعٍ مكافئٍ، فإن التقريب الدقيق لـــ H يمكن أن يتم الحصول عليه من:

$$\frac{H_L}{AE} K = \frac{w_D}{H_D}\int_0^l \delta d_x - \frac{1}{2}\int_0^l \delta'' \delta d_x$$

$$K = l\left[\frac{1}{4}\left(\frac{5}{2} + \frac{16f^2}{l^2}\right)\sqrt{1+\frac{16f^2}{l^2}} + \frac{3l}{32f}\log_e\left(\frac{4f}{l} + \sqrt{1+\frac{16f^2}{l^2}}\right)\right]$$

حيث:

$$\delta'' = \frac{d^2\delta}{dx^2}$$

وإذا أمكن إهمال الاستطالة المرونية و"δ فإن:

$$H_L = \frac{\int_0^l M_L d_x}{\int_0^l y_D d_x} = \frac{3}{2fl}\int_0^l M_L d_x$$

إذن، من أجل حمولة موزعة بانتظام أفقياً w_L:

$$\int_0^l M_L d_x = \frac{w_L l^3}{12}$$

ويكون التزايد في المركبة الأفقية للشد الناشئ عن الحمولة الحية:

$$H_L = \frac{3}{2fL}\frac{w_L l^3}{12} = \frac{w_L l^2}{8f} = \frac{w_L l^2}{8}\frac{8H_D}{w_D l^2}$$

$$= \frac{w_L}{w_D} H_D$$

أنظمة الأكبال Cable Systems

يُعتبر الكبل المُقَعَّر نحو الأسفل عادةً هو الكبل الذي يعبأ بالحمولة (الشكل 10.4). فإذا كان الإجهاد المسبق في هذا الكبل يتجاوز الإجهاد في الكبل الآخر، فإن الترددات الطبيعية للاهتزاز في الكبلين تختلف دائماً من أجل أي قيمة للحمولة الحية. ولتجنُّب حدوث الرنين (يعني حدوث سعة اهتزاز كبيرة نتيجة التواقت) لابدَّ من تزايد الفارق بين ترددات الكبلين مع تزايد الحمولة.

وهكذا، ينـــزعُ الكبلان ليأخذا شكلين مختلفين تحت تأثير حمولات ديناميكية معينة.

وبالمحصلة، تقوم طاقة الاهتزاز المنتقلة من أحد الأكبال إلى الكبل الآخر بتخميد الاهتزازات في كلا الكبلين.

يمكن أن يُقدَّر التردد الطبيعي لكل كبل، دورة بالثانية، من:

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l}\sqrt{\frac{Tg}{w}}$$

حيث:

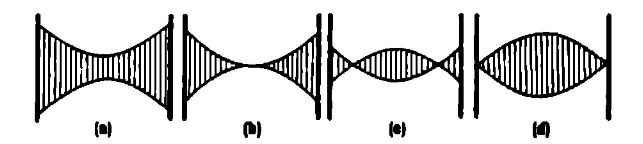
n = عدد صحيح، يساوي الواحد من أجل نمط الاهتزاز الأولي (الأساسي) ويساوي 2 من أجل نمط الاهتزاز الثانوي، ....

l = مجاز الكبل، ft (m).

w = الحمولة المؤثرة على الكبل، Kip/ft (kN/m).

g = التسارع الناشئ عن الجاذبية = 32.2 (ft/s^2).

T = شد الكبل، Kip (N).



الشكل 10.4 منظومات أكبال مستوية (تقع في مستوي واحد)
(a) كبلان منفصلان كلياً. (b) كبلان يتقاطعان في وسط المجاز
(c) كبلان متصالبان (d) كبلان يلتقيان عند المساند.

تَفرضُ انفراجات عناصر الجائز الشبكي الكبلي (الكابولي) الشرط الذي يجب أن يكون فيه التغير في ارتخاءات الأكبال، نتيجة تأثير حمولة معطاة، متساويةً (يعني؛ الانفراجات الزاوية بين عناصر الجائز الشبكي هي التي تتحكم بارتخاء الكبال). مع ذلك، قد يكون التغيران في شد الكبلين غير متساويين.

فإذا كانت نسبة الارتخاء إلى المجاز f/l صغيرة (أقل من 0.1 تقريباً)، من أجل كبل على شكل قطع مكافئ، فإن التغيُّر في الشد يُعطى على نحوٍ تقريبي بـــ:

$$\Delta H = \frac{16}{3}\frac{AEf}{l^2}\Delta f$$ (تغير قيمة الشد في كبل نتيجة تأثير حمولة)

حيث:

Δf = التغير في الارتخاء للكبل.

A = مساحة المقطع العرضي للكبل.

E = معامل مرونة فولاذ الكبل.

11

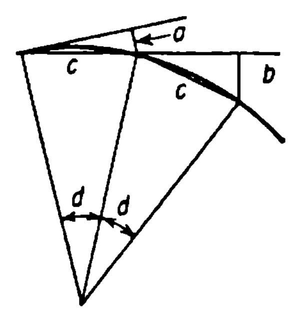
صيغ الطرقات
والطرقات العامة (السريعة)

Highway and Road Formulas

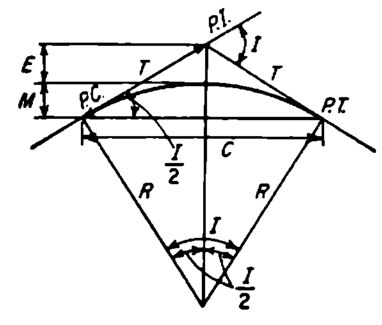
Circular Curves المنحنيات الدائرية

المنحنيات الدائرية هي النموذج الأكثر شيوعاً في المنحني الأفقي المستخدم لوصل المقاطع ذات المسات (المستقيمات) المتقاطعة للطرق العامة أو لخطوط السكك الحديدية. ففي أغلب بلدان العالم ثمة طريقتان لتعريف المنحنيات الدائرية تُستخدمان: تُعرِّفُ الطريقة الأولى، المستخدمة عموماً في أعمال الخط الحديدي، درجة المنحني بالزاوية المركزية المُحدَّدة بقوس طوله 100 قدم (30.48 متر).

المصطلحات والرموز المستخدمة بشكل عام في المنحنيات الدائرية تمّ إدراجها لاحقاً وإيضاحها في الشكلين 11.1 و11.2.



الشكل 11.2 الانزياحات عن المنحني الدائري



الشكل 11.1 منحنٍ دائري

PC = نقطة الانحناء، بداية المنحني.

PI = نقطة تقاطع المماسات.

PT = نقطة التماس، نهاية المنحني.

R = نصف قطر المنحني، ft (m).

D = درجة المنحني (انظر النص السابق).

I = زاوية تغيُّر الاتجاه بين المماسين عند PI، أيضاً الزاوية المركزية للمنحني.

T = المسافة المماسية، وهي المسافة من PI إلى PC أو إلى PT، ft (m).

L = طول المنحني من PC إلى PT مقاساً على وتر طوله 100 قدم (30.48 متر) من أجل التعريف الوتري، أو مقاساً على قوس طوله 100 قدم (30.48 متر) من أجل التعريف القوسي، ft (m).

C = طول امتداد الوتر من PC إلى PT، ft (m).

E = المسافة الخارجية، وهي المسافة من PI إلى النقطة الوسطية (منتصف للمنحني)، ft (m).

M = الإحداثي الرأسي الأوسط، وهي المسافة من النقطة الوسطية للمنحني إلى النقطة الوسطية للوتر، ft (m).

d = الزاوية المركزية لجزء من المنحني (d < D).

l = طول المنحني (القوس) المُعيَّن بالزاوية المركزية d، ft (m).

c = طول المنحني (الوتر) المُعيَّن بالزاوية المركزية d، ft (m).

a = انزياح المماس من أجل وتر طوله c، ft (m).

b = انزياح الوتر من أجل وتر طوله c، ft (m).

معادلات المنحنيات الدائرية

$R = \frac{5,729.578}{D}$ دقيق من أجل التعريف القوسي، وتقريبي من أجل التعريف الوتري.

$R = \frac{50}{\sin \frac{1}{2} D}$ دقيق من أجل التعريف الوتري.

$T = R \tan \frac{1}{2} I$ دقيق

$E = R\,\text{exsec}\frac{1}{2}I = R\left(\sec\frac{1}{2}I - 1\right)$ دقيق

$M = R\,\text{vers}\frac{1}{2}I = R\left(1 - \cos\frac{1}{2}I\right)$ دقيق

$C = 2R\,\text{Sin}\frac{1}{2}I$ دقيق

$L = \frac{100I}{D}$ دقيق

$L - C = \frac{L^3}{24R^2} = \frac{C^3}{24R^2}$ تقريبي

$d = \frac{DI}{100}$ دقيق بالنسبة للتعريف القوسي.

$d = \frac{Dc}{100}$ تقريبـــي بالنسبة للتعريف الوتري.

$\text{Sin}\frac{d}{z} = \frac{c}{2R}$ دقيق بالنسبة للتعريف الوتري.

$a = \frac{c^2}{2R}$ تقريبـــي.

$b = \frac{c^2}{R}$ تقريبـــي.

ملاحظة : جميع العلاقات السابقة تقرأ من اليسار إلى اليمين.

Parabolic Curves منحنيات القطوع المكافئة

تُستخدم منحنيات القطوع المكافئة لوصل مقاطع الطرق العامة والخطوط الحديدية ذات الميول المختلفة. فيعطي استخدام منحني القطع المكافئ تغيراً متدرجاً في السير على امتداد المنحني.

المصطلحات والرموز المستخدمة عموماً في منحنيات القطوع المكافئة تم إدراجها لاحقاً وتوضيحها في الشكل 11.3.

PVC = نقطة الانحناء الرأسي، بداية المنحني.

PVI = نقطة التقاطع الرأسي للميلين على كل جانب من المنحني.

PVT = نقطة التماس الشاقولية، نهاية المنحني.

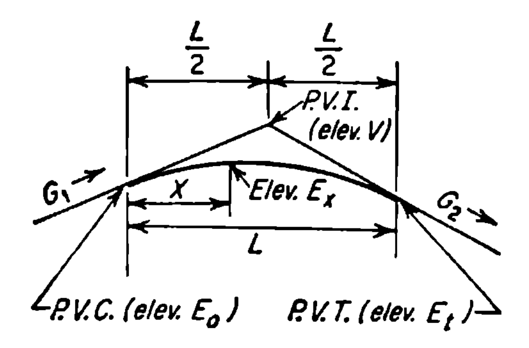
G_1 = الميل في بداية المنحني، ft/ft (m/m).

G_2 = الميل في نهاية المنحني، ft/ft (m/m).

L = طول المنحني، ft (m).

R = معدّل تغيُّر الميل، ft/ft^2 (m/m^2).

V = علو (ارتفاع) الـــ PVI، ft (m).



الشكل 11.3 منحني قطع مكافئ رأسي (منحني قمة)

E_0 = علو (ارتفاع) الـــ PVC، ft (m).

E_t = علو (ارتفاع) الـــ PVT، ft (m).

x = بعد أي نقطة على المنحني بدءاً من الـ PVC، ft (m).

E_x = علو النقطة x بدءاً من الـ PVC، ft (m).

X_s = البعد من الـ PVC إلى أخفض نقطة على منحني التدلي أو إلى أعلى نقطة على منحني القمة، ft (m).

E_s = ارتفاع أخفض نقطة على منحني التدلي أو أعلى نقطة على منحني القمة، ft(m).

معادلات منحنيات القطوع المكافئة

يُفترض لا بل يجب أن تستخدم دائماً الكميات الجبرية في معادلات منحني القطع المكافئ المعطاة لاحقاً. الميول الصاعدة موجبة والميول الهابطة سالبة.

$$R = \frac{G2 - G_1}{L}$$

$$E_o = V - \frac{1}{2} L G_1$$

$$E_x = E_o + G_1 x + \frac{1}{2} R x^2$$

$$x_s = -\frac{G_1}{R}$$

$$E_s = E_o - \frac{G_1^2}{2R}$$

ملاحظة: إذا كانت x_s سالبة أو $x_s > L$، فلا يكون للمنحني نقطة مرتفعة أو نقطة منخفضة.

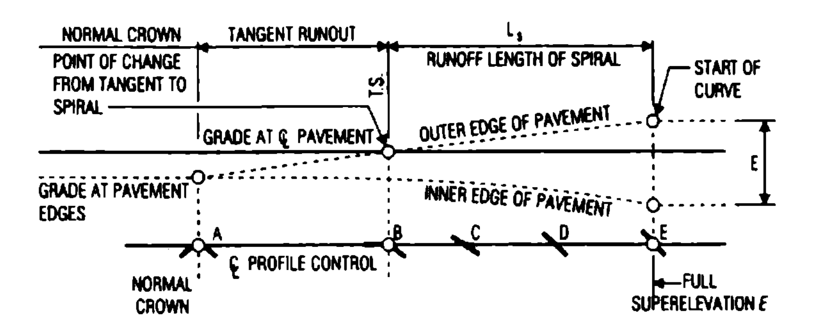
منحنيات الطرق العامة وسلامة السائق

Highway Curves And Driver Safety

تؤخذ الاحتياطات والشروط عادةً عند الانتقال التدريجي من المماس إلى بداية المنحني الدائري وذلك من أجل سلامَة وراحة السائقين.

وكما هو موضح في الشكل 11.4، تكون الحافة الخارجية مرفوعة أولاً بطريقة نموذجية حتى يصير النصف الخارجي للمقطع العرضي على سوية التحدُّب (النقطة B). ثم يتم رفع الحافة الخارجية أيضاً حتى يصير المقطع العرضي مستقيماً (النقطة C). ومما ذُكر، يكون المقطع العرضي بأكمله قد تمَّ تدويره حتى الوصول إلى العلو الإضافي كاملاً (النقطة E).

تكون المقاطع العرضية، للطرق العامة المزودة بعلو إضافي، مستخدمة على نحو نموذج في منحنيات الطرق العامة البرية والطرق السريعة المدنية. ونادراً ما يستخدم العلو الإضافي في شوارع المناطق المأهولة والمناطق التجارية والصناعية.



الشكل 11.4 تغيُّرات العلو الإضافي على امتداد منحني الانتقال الحلزوني.

استقامات الطريق العام Highway Alignments

يرتبط تصميم الشكل الهندسي، لطريق عام، بالاستقامة (الامتداد الخطي) الأفقية والشاقولية بالإضافة إلى عناصر المقطع العرضي.

فالامتداد الخطي الأفقي لطريق عام يُعرِّفُ موقعه واتجاهه في المشهد الأفقي.

أما الامتداد الخطي الشاقولي لطريق عام فيُتَعَامَل مع شكله في المشهد الجانبي.

ومن أجل طريق عام بحارات مرورية متجاورة، يمكن أن يُمثِّل الامتداد الخطي بالخط المركزي للطريق.

وضع المحطات

تُقاس المسافة على امتداد الاستقامة الأفقية بواسطة محطات. وتُعرَّف المحطة الكاملة بـــ 100 قدم (30.48 m) والمحطة النصفية بـــ 50 قدم (15.24 n). فالمحطة 50 + 100 هي محطة تبعد 150 قدم (45.7 m) من بداية الاستقامة أي من المحطة 00 + 0. والنقطة التي تبعد 1492.27 قدم (454.84 m) من المحطة 00 + 0 يُرمز لها بـــ 92.27 + 14، وهي تحدد موقع 14 محطة، 1400 قدم (426.72 m) زائد 92.27 قدم (28.12 m)، وذلك من نقطة بداية الاستقامة. وتقاس هذه المسافة أفقياً على امتداد الخط المركزي للطريق لتوضيح إذا ما كانت مماسية أو منحنية أو تركيباً من الاثنين معاً.

مسافة الرؤية (مسافة رؤية توقف السائق)

وهي الطول المطلوب من الطريق، بين العربة وجسم عشوائي (في نقطة ما من انحدار الطريق)، لتمكين السائق من إيقاف العربة بأمان قبل وصوله العائق. ولن يكون هذا مُربكاً بأخذ مسافة رؤية المرور أو العبور التي تعرفها أشتو (الجمعية الوطنية الأميريكية الرسمية للطرق والنقل) بـــ "طول الطريق الذي يكون مرئياً على

امتداد تقدم السائق". يُبيِّن الشكل 11.5 الوسطاء التي تتحكم بمسافة الرؤية فوق قمة منحني شاقولي.



الشكل 11.5 مسافة الرؤية فوق منحني رأسي مُحدَّب

تعرف أشتو، من أجل المنحنيات الرأسية المحدبة، الطول الأصغري L_{min} للمنحنيات الرأسية المحدبة، بالاستناد على مسافة الرؤية المطلوبة S، والتي تُعطى وفق ما يلي:

$$L_{min} = \frac{AS^2}{100(\sqrt{2H_1} + \sqrt{2H_2})^2} S < L$$

وعندما يكون علو العين 3.5 قدم (1.07 m) وارتفاع الجسم 0.5 قدم (0.152 m) فإن:

$$L_{min} = \frac{AS^2}{1329} S < L$$

أيضاً، تُعطى L_{min} في المنحنيات الرأسية المحدبة بـ:

$$L_{min} = 25 - \frac{200(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2})^2}{AS^2} S > L$$

وعندما يكون علو العين 3.5 قدم (1.07 m) وعلو الجسم 0.5 قدم (0.152 m) تصبح:

$$L_{min} = 25 - \frac{1329}{AS^2} S > L$$

حيث:

A = الفارق الجبري في ميليْ المماسين للمنحني الرأسي، يؤخذ بنسبة مئوية.

H_1 = علو العين فوق سطح الطريق، ft (m).

H_2 = علو الجسم فوق سطح الطريق، ft (m).

أداة التصميم التي تتحكم بالمنحنيات الشاقولية يمكن ترسيخها باستخدام مُعدَّل الانحناء الرأسي K المعرف بالعلاقة:

$$p\,K = \frac{L}{A}$$

حيث:

L = طول المنحني الرأسي، ft (m)

A تمَ تعريفها سابقاً.

يفيد K في تعيين مسافة الرؤية الأصغرية وهي طول المنحني الرأسي من النقطة PVC إلى نقطة التحول (نقطة النهاية القصوى على المحُدَّب ونقطة النهاية الدنيا على المقعَّر). ويتم إيجاد هذه المسافة بجداء K بتدرج الاقتراب.

لقد تمَّ نشر القيم الموصى بها لـــ K من أجل سرعات تصميمية متعددة ومسافات رؤى، خاصة بمنحنيات التحدب والتقعر الشاقولي، من قبل أشتو.

الأرقام الإنشائية الخاصة بالرصف المرن
Structural Numbers For Flexible Pavements

يتطلب تصميم الرصف المرن أو الرصف بالمعالجة السطحية، المتوقع أن يحتمل أكثر من 50,000 تكرار لحمولة محور Kip - 18 منفرد مكافئ، تشخيصاً للعدد الإنشائي SN الذي يستخدم كأداة قياس لقدرة تحمل الرصف الحمولات المحورية المتوقعة.

ويُعرَّف العدد الإنشائي في طريقة تصميم أشتو بـــ:

$$SN = SN_1 + SN_2 + SN_3$$

حيث:

SN_1 = العدد الإنشائي للطبقة السطحية = $a_1 D_1$.

a_1 = أمثال ثخانة الطبقة السطحية.

D_1 = الثخانة الفعلية للطبقة السطحية، in (mm).

SN_2 = العدد الإنشائي لطبقة الأساس = $a_2 D_2 m_2$

a_2 = أمثال ثخانة طبقة الأساس.

D_2 = الثخانة الفعلية لطبقة الأساس، in (mm).

m_2 = أمثال تصريف طبقة الأساس.

SN_3 = العدد الإنشائي لطبقة ما تحت الأساس = $a_3 D_3 m_3$

a_3 = أمثال ثخانة طبقة ما تحت الأساس.

D_3 = الثخانة الفعلية لطبقة ما تحت الأساس، in (mm).

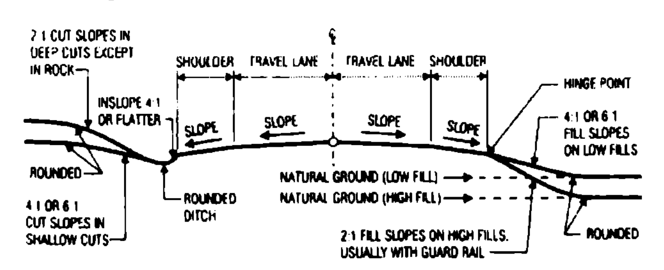
m_3 = أمثال تصريف طبقة ما تحت الأساس.

إن أمثال ثخانة الطبقات a_n الخاصة بالمواد المستخدمة في كل طبقة تحوّل الأعداد الإنشائية إلى الثخانة الفعلية. فهي قياس للقدرة النسبية للمواد لتعمل كمركبة

إنشائية في الرصف. هنالك العديد من وكالات النقل لها قيمها الخاصة بها بما يخص هذه الأمثال. وكدليل أو كموجه عام، يمكن أن تكون أمثال ثخانة الطبقات، 0.44 بالنسبة لطبقة سطحية من البيتون الإسفلتي، و0.14 بالنسبة لطبقة الأساس من الأحجار المكسرة، و0.11 بالنسبة لطبقة ما تحت الأساس من الحجرِ الرملي.

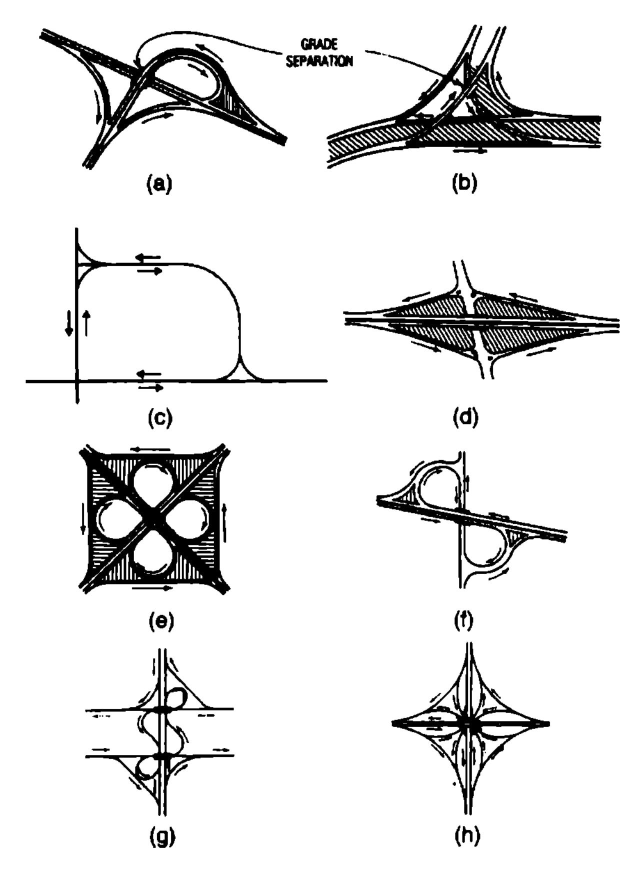
يجب أن يتم تدوير قيمة السماكات D_1 وD_2 وD_3 إلى أقرب نصف $\left(\frac{1}{2}\right)$ من الإنش (12.7 mm) (يعني لا يجوز وضع 7.3 إنش مثلاً، بل يجب وضع 7.5 إنش). ويعتمد اختيار ثخانة الطبقة عادةً على معايير الوكالة وإمكانية صيانة الرصف والإمكانيات الاقتصادية.

يوضح الشكل 11.6 الميول العرضية الخطية من طريق عام نموذجي بحارتيْ مرور.



الشكل 11.6 طريق عام نموذجي ذو حارتين مع ميول عرضية خطية.

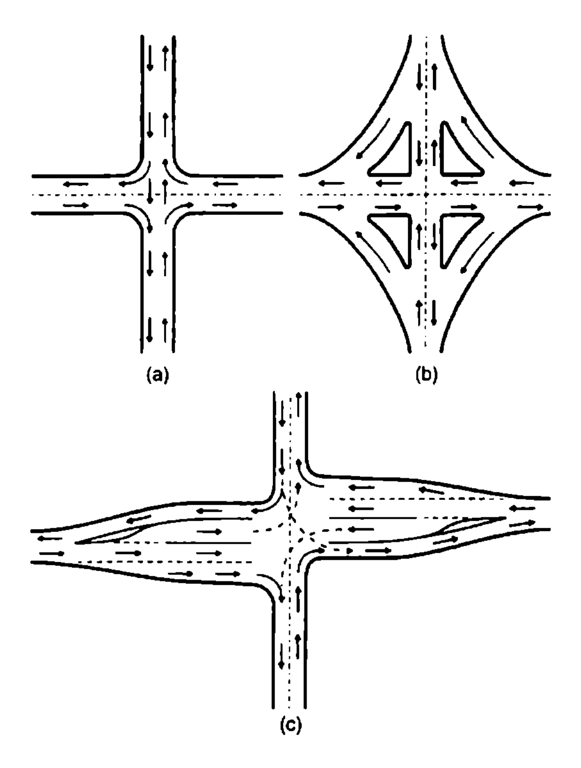
ويوضح الشكل 11.7 استخدام المنحنيات الدائرية في عددٍ من الطرق العامة المتقاطعة على سويات منفصلة.



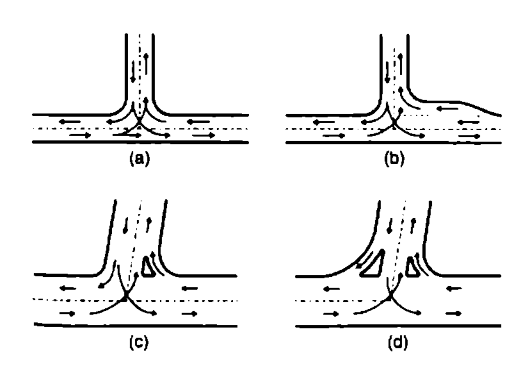
الشكل 11.7 نماذج من طرقات عامة ذات تقاطعات متبادلة على سويات منفصلة (أو مختلفة). (a) تقاطع على شكل T أو الترامبيت (أداة موسيقية). (b) تقاطع على شكل Y أو دلتا. (c) تقاطع ربعي. (d) تقاطع على شكل كرت الدينار في لعبة الشدة. (e) تقاطع ورقة البرسيم التام. (f) تقاطع ورقة البرسيم الجزئي. (g) تقاطع نصف مباشر. (h) تقاطع بأربع حارات مرورية وفق جميع الاتجاهات.

يوضح الشكل 11.8 استخدام المنحنيات في أربع تقاطعات على نفس السوية (لا يوجد انفصال مروري) من طرقات عامة. ويوضح الشكل 11.9 استخدام المنحنيات في تقاطعات على شكل حرف T (ثلاثية الفروع) على نفس السوية.

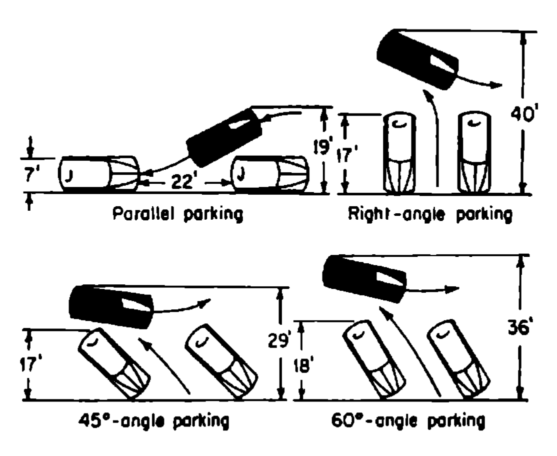
ويوضح الشكل 11.10 حيز الشارع وحيز المناورة المستخدمة في أوضاع اصطفاف متعددة للسيارات.



الشكل 11.8 حارات انعطاف في طريق عام. (a) غير موجهة. (b) موجهة. (c) مضاءة بإشارات مرورية.



الشكل 11.9 حارات انعطاف مرورية لطريق عام. (a) غير موجه. (b) تقاطع مع حارة الانعطاف الأيمن. (c) تقاطع مع طريق انعطاف أحادي. (d) تقاطع موجه بزوج من طرق الانعطاف.



الشكل 11.10 حيز الشارع وفضاء المناورة المستخدمان في أوضاع اصطفاف متعددة للسيارات. الواحدات المكافئة في النظام الأميريكي USCS (أو الدولي SI) بالقدم (بالمتر): 7 ft (2.13 m)، 17 ft (5.18 m)، 18 ft (5.49 m)، 19 ft (5.79 m)، 22 ft (6.7 m) ، 29 ft (8.84 m) ، 36 ft (10.97 m)، 40 ft (12.19 m).

Transition (Spiral) Curves منحنيات الانتقال (الحلزونية)

تتعرض العربة، فور دخولها في المنحني الدائري الأفقي هي وحمولتها، إلى قوى طاردة (نابذة) مركزية. وكلما كان دخول العربات إلى المنحني الدائري سريعاً والانحناء حاداً، ازداد التأثير على العربات والسائقين من جراء الانتقال من المماس إلى المنحني. وفي حال لم يتم تزويد منحنيات الانتقال الحلزونية، ينـــزع السائقون لإيجاد منحنياتهم الانتقالية الخاصة بهم بواسطة التحرك جانبياً في حارتهم المرورية وأحياناً بمناورة خطرة إلى الحارة المجاورة.

يمكن حساب الطول الأصغري L للمنحني الحلزوني، مقدراً بـــ ft (m)، من:

$$L = \frac{3.15V^3}{RC}$$

حيث:

V = سرعة العربة، mi/h (Km/h).

R = نصف قطر المنحني الدائري الذي سيوصل به الحلزون، ft (m).

C = معدّل تزايد التسارع القطري.

تَضَمَّنت القيم العملية، التي أظهرت صورة عن الراحة والأمان، قيماً لـــ C غالباً ما تراوحت بين 1 و3، وذلك بالنسبة للطرق العامة. (أما بما يخص خطوط السكك الحديدية فغالباً ما تؤخذ C مساوية للواحد). والطريقة الأخرى الأكثر عملية، من أجل حساب الطول الأصغري للمنحني الحلزوني المطلوب للوصل مع المنحنيات الدائرية، هي أن تبنى أو أن تستند على الطول المطلوب للمسيل المطري ذي العلو الإضافي.

تصميم شبكة التصريف التحتية لطريق عام
Designing Highway Culverts

مصرف طريق عام هو وسيلة تصريف تشبه الأنبوب تسمح للماء بالجريان تحت الطريق دون أي إعاقة لحركة المرور. وتكون أنابيب الفولاذ الحلزونية والمتموّجة شائعة الاستخدام في شبكة التصريف التحتية لأنها يمكن أن تُنصَبَ وتُمدَّ بسرعة وكذا لعمرها المديد وتكلفتها المنخفضة ولكونها تتطلب صيانة قليلة. وفي حال استخدام الأنبوب الفولاذي المتموّج، لابد أن تكون هناك مقاومة ارتباط (قوة خط الوصل بين إنبوبين) كافية لاستيعاب دفع الضغط الحلقي أو الخطي (c) الآتي من الحمولة الإجمالية التي يعبأ بها الأنبوب. ويساوي دفع الضغط هذا للمنشأة، مقدراً بـــ lb/ft (N/m)، إلى:

$$C = (LL + DL)\frac{S}{2}$$

حيث:

LL = ضغط الحمولة الحية، lb/ft^2 (N/m^2).

DL = ضغط الحمولة الميتة، lb/ft^2 (N/m^2).

S = المجاز (أو القطر)، ft (m).

إن مقاومة التداول (تعبئة ونقل وتفريغ) والتنصيب يجب أن تكون كافية لتستوعب عمليتيْ شحن ووضع الأنبوب في مكانه المطلوب في موقع العمل على الطريق العام.

وتُقاس مقاومة التداول بعامل المرونة المُعيَّن من العلاقة:

$$FF = \frac{D^2}{EI}$$

حيث:

D = قطر الأنبوب أو المجاز الأعظمي، in (mm).

E = معامل مرونة مادة الأنبوب، lb/in^2 (MPa).

I = عزم العطالة بواحدة البعد في المقطع العرضي لجدار الأنبوب، in^4/in (mm^4/mm).

يكون ضغط الإجهاد الحلقي الذي يصبح عنده التحنيب حرجاً في منطقة تبادل الفعل، وذلك بالنسبة لأقطار أقل من 126.5 r/K، مساوياً إلى:

$$f_c = 45{,}000 - 1.406\left(\frac{KD}{r}\right)^2$$

أمّا من أجل أقطار أكبر من 126.5 r/K، فيكون f_c:

$$f_c = \frac{12E}{(KD/r)^2}$$

حيث:

f_c = إجهاد التحنيب، lb/in^2 (MPa).

K = عامل صلابة التربة.

D = قطر الأنبوب أو مجازه، in (mm).

r = نصف قطر العطالة لجدار الأنبوب، in^4/in (mm^4/mm).

E = معامل المرونة لمادة الأنبوب، lb/in^2 (MPa).

ملاحظة: من أجل ردمية ممتازة مرصوصة حتى نسبة 90 إلى 95 بالمئة من الكثافة المعيارية، تؤخذ : K = 0.22.

ومن أجل ردمية جيدة مرصوصة إلى نسبة 85 بالمئة من الكثافة المعيارية، تؤخذ: $K = 0.44$.

يُعطى تَشَوُّه الماسورة (الأنبوب) بالصيغة المسماة صيغة إيوا ــ Iowa formula. وتعطي هذه الصيغة التأثير النسبي على مقاومة الأنبوب والضغط الجانبي السالب المقاوم للحركة الأفقية لجدار الأنبوب، أو بالصيغة:

$$\Delta_x = \frac{D_1 K W_c r^3}{EI + 0.061 E' r^3}$$

حيث:

Δ_x = التشوه الأفقي للأنبوب، in (mm).

D_1 = عامل تخلّف التشوّه (تشوّه متأخر).

K = ثابتِ التوضع الطبقي (يعتمد على زاوية توضع الطبقات).

W_c = الحمولة الشاقولية بواحدة طول الأنبوب، ليبرة بالإنش الخطي (N/mm).

r = نصف القطر الوسطي للأنبوب، in (mm).

E = معامل مرونة مادة الأنبوب، lb/in^2 (MPa).

I = عزم العطالة بواحدة البعد للمقطع العرضي لجدار الأنبوب، in^4/in (mm^4/mm).

E' = معامل المقاومة العكسية (السالبة) للتربة المُغلّفة، lb/in^2 (MPa).

لم يسبق وأنْ تمَّ ربط معامل التربة 'E بأنواع الردميات والرص. ويَحدُّ هذا الربط، في الحقيقة، من فاعلية الصيغة في تحليل المنشآت المنصَّبة الواقعة تحت المراقبة.

الإجراءات التصميمية المتبعة في الجمعية العلمية الأميريكية للفولاذ والحديد (AISI)

American Iron And Steel Institute (Aisi) Design Procedure

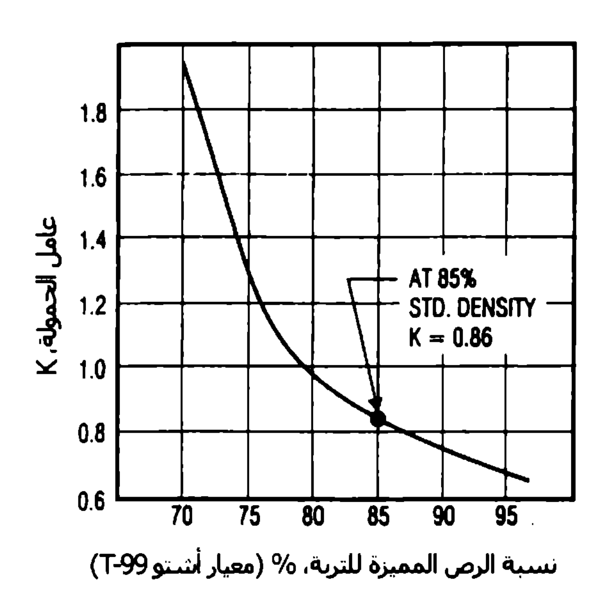
الإجراءات التصميمية، الخاصة بمنشآت الفولاذ المتموّج، الموصى بها في الكتاب المرجعي المساعد للجمعية حول شبكة الصرف الفولاذي ومشاريع الطرق العامة، أُعطيت بما سيأتي.

كثافة الردمية

اختر نسبة مئوية للرص في ردمية الأنبوب من أجل التصميم. ويُفترَض لا بل يجب أن تعكس القيمة المختارة، أهمية وحجم المنشأة وكذا الجودة التي يمكن توقعها منطقياً. القيمة الموصى بها في المشاريع الرتيبة (الروتينية) هي 85 بالمئة. وتطبَّق عادةً هذه القيمة على التنصيبات السهلة التي تتطلب معظم المواصفات من أجلها نسبة رص تصل إلى % 90. ومهما يكن من أمر، بما يخص المنشآت الأكثر أهمية في حالات الردم الأكثر جودة، لابد من إعطاء الأهمية والاعتبار في انتقاء ردمية عالية الجودة واحتياج هذه الردمية في الإنشاء.

الضغط التصميمي

إذا كان علو غطاء الردم مساوياً إلى أو أكبر من مجاز أو قطر القطعة الإنشائية، عليك أن تقوم بإدخال مخطط عامل الحمولة (الشكل 11.11) لتعيين النسبة المئوية للحمولة الإجمالية الفاعلة على الفولاذ. ففي المشاريع الروتينية، تعطي نسبة رص % 85 للتربة، عامل الحمولة: K = 0.86.



الشكل 11.11 عوامل التحميل للأنابيب الفولاذية المتموجة موضوعة ضمن المخطط كتابع للرص المميز للردمية.

تُضرب الحمولة الإجمالية بـــ K للحصول على حمولة الضغط التصميمية P_v الفاعلة على الفولاذ.

إذا كان علو غطاء الردم أقل من قطر أحد الأنابيب، فتفترض الحمولة الإجمالية TL هي الفاعلة على الأنبوب، ويكون $TL = P_v$، يعني:

$$P_v = DL + LL + I \qquad H < S$$

وفي حال كان علو الردم مساوياً إلى، أو أكبر من قطر أحد الأنابيب، فإن:

$$P_v = K\,(DL + LL + I) \qquad H \geq S$$

حيث:

P_v = حمولة الضغط التصميمية، Kip/ft^2 (MPa/m^2).

K = عامل الحمولة.

DL = الحمولة الميتة، Kip/ft^2 (MPa/m^2).

LL = الحمولة الحية، Kip/ft^2 (MPa/m^2).

I = حمولة الرص، Kip/ft^2 (MPa/m^2).

H = علو غطاء الردم، ft (m).

S = مجاز أو قطر الأنبوب، ft (m).

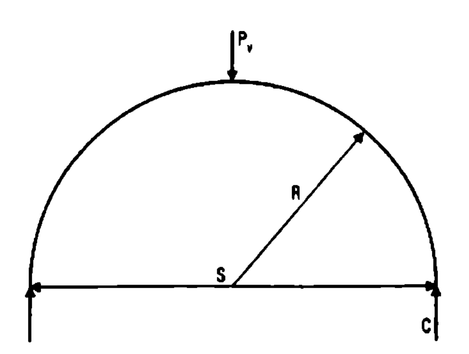
الضغط الحلقي (الخطي)

يساوي دفع الضغط الحلقي C على الجدار الأنبوبي، مقدراً بـ Kip/ft (MPa/m)، إلى حمولة الضغط القطرية P_v، المقدرة بـ Kip/ft^2 (MPa/m^2)، الفاعلة على الجدار والمضروبة بنصف قطر الجدار R المقدر بـ ft (m). أو: $C = P_v R$.

قوة الدفع هذه - المسماة بالضغط الحلقي - هي القوة التي يعبأ بها الفولاذ. فالضغط الحلقي هو حمولة محورية تعمل بصورة مماسية على الجدار الأنبوبي (الشكل 11.12).

في المنشآت التقليدية التي يقترب فيها القوس العلوي من نصف دائرة، يكون من الملائم استبدال نصف قطر الجدار بنصف المجاز. وبالتالي:

$$C = P_V \frac{S}{2}$$



الشكل 11.12 حمولة ضغط قطري P_v، على جدار أنبوبي محني، مقاومة بدفع الضغط الحلقي C.

الإجهاد الجداري المسموح

يُعبَّر عن الضغط الحدّي في جدار الأنبوب بوساطة المعادلتين (11.1) و(11.2) اللاحقتين.

يساوي إجهاد الجدار الحدّي إلى إجهاد الخضوع الأصغري المُميّز للفولاذ ويكون مطبقاً على منطقة خضوع أو تمصّر (تهشّم) الجدار. تطبق المعادلة (11.1) على منطقة تبادل فعل الخضوع والتحنيب الحلقي. أما المعادلة (11.2) فتطبَّق على منطقة التحنيب الحلقي.

عندما لا تتجاوز نسبة قطر الأنبوب أو مجازه على نصف قطر العطالة للمقطع العرضي للأنبوب، D/r، المقدار 294، فعندها يمكن أن يؤخذ الإجهاد الحدّي للجدار مساوياً إلى مقاومة خضوع الفولاذ:

$$F_b = F_y = 33 \text{ Ksi } (227.4 \text{ MPa})$$

وعندما تتجاوز النسبة D/r المقدار 294 ولكن لا تتعدى المقدار 500، فعندها يُعطى الإجهاد الحدّي للجدار، مقدراً بـــ Ksi (MPa)، بالعلاقة:

$$F_b = 40 - 0.000081\left(\frac{D}{r}\right)^2 \quad (11.1)$$

وعندما تتجاوز النسبة D/r المقدار 500:

$$F_b = \frac{4.93\times10^6}{(D/r)^2} \quad (11.2)$$

يتم تطبيق عامل أمان مقداره 2 على الإجهاد الحدي للجدار من أجل الحصول على الإجهاد التصميمي F_c، المقدر بـــ Ksi (MPa)، من العلاقة:

$$F_c = \frac{F_b}{2} \quad (11.3)$$

ثخانة الجدار

تُحسب مساحة الجدار المطلوبة بواحدة العرض، in^2/ft (mm^2/m)، من الضغط الحلقي C المحسوب في جدار الأنبوب ومن الإجهاد المسموح F_c:

$$A = \frac{C}{F_c} \quad (11.4)$$

وذلك أن تنتقي من خلال جدول الـــ AISI، الخاص بالمواسير التحت أرضية، ثخانة الجدار التي تعطي المساحة المطلوبة الموافقة لمساحة التموج (الفولاذي) المستخدمة في انتقاء الإجهاد المسموح.

اختبار صلابة التداول

لقد تمّ ترسيخ مستلزمات صلابة الأنبوب الأصغرية ليتحمَّل عمليتيْ تداوله وتنصيبه، دون أي حرص مفرط أو تقوية له، من خلال الممارسة العملية والخبرة. حيث يُحدِّد عامل المرونة الناتج FF مقاسات كل تركيب من وتيرة أو خطوات التموّج والثخانة المعدنية:

$$FF = \frac{D^2}{EI} \qquad (11.5)$$

حيث:

E = معامل مرونة الفولاذ، Ksi (MPa) = 30,000 Ksi (206,850 MPa).

I = عزم عطالة الجدار، in^4/in (mm^4/mm).

يُوصى بالقيم الأعظمية التالية لـ FF من أجل التنصيبات العادية:

FF = 0.0433 من أجل أنبوب مُجمَّع في المصنع بقطر أقل من 12.00 إنش (30.48 cm) وبخطوط اتصال مبرشمة أو ملحومة أو متداخلة حلزونياً (شرار).

FF = 0.0200 من أجل أنبوب مجمع في الحقل بقطر أكبر من 12.00 إنش (30.48 cm) وبخطوط اتصال بواسطة البراغي.

أما القيم الأكبر من ذلك، لـ FF، فيمكن استخدامها بنوع من الحذر أو وفق ما يمليه التطبيق العملي. وتمثل حالة حفر الخنادق لتركيب المحارير الكبيرة، واحدة من تلك الحالات، وكذلك الأمر بالنسبة لاستخدام أنابيب الألومينيوم. فمثلاً، عامل المرونة المسموح لأنبوب الألومينيوم في بعض مواصفات الدول يزيد بمرتين عمّا هو موصى به هنا للفولاذ، لأن الألومينيوم يمتلك ثلث قساوة الفولاذ فقط، حيث عامل مرونة الألومينيوم 10.000 Ksi مقابل 30.000 Ksi للفولاذ.

وعندما يتم قبول درجة عالية من المرونة للألومينيوم، يكون من العدل قبولها بالنسبة للفولاذ.

اختبار خطوط الاتصال بوساطة البراغي

تكون خطوط الوصل النظامية للأنابيب المُجمَّعة في المصنع محققة من أجل جميع التصاميم عندما يقع الإجهاد المسموح الأعظمي للجدار قريباً من (113.8 MPa) 16.5 Ksi.

وعلى أي حال، تتم متابعة تقييم حالة خطوط الاتصال بوساطة البراغي في المصنع أو في الحقل بالاستناد على قيم التجارب الخاصة بالأعمدة اللامحنية واللامسنودة.

فيجب أن يكون لخط الاتصال بالبراغي (النظامي من أجل الصفائح الإنشائية) مقاومة اختبار أكبر بمرتين من الحمولة التصميمية في جدار الأنبوب.

12

صيغ علم الهيدروليك والمنشآت المائية

Hydraulics and Waterworks Formulas

حتى يكون استخدام الصيغ في هذا الفصل بسيطاً، أَسرَدَ الجدول 12.1، الرموز والتسميات ونظام الواحدات المتبع في الولايات المتحدة (USCS) ونظام الواحدات الدولية (SI)، كلٌّ وفق تعابيره.

الجدول 12.1 الرموز والتسميات والأبعاد والواحدات المستخدمة في هندسة المياه.

الرمز	التسمية	الأبعاد	الواحدات المستخدمة في الولايات المتحدة (USCS)	الواحدات الدولية SI
A	المساحة	L^2	ft^2	mm^2
C	أمثال خشونة تشيزي	$L^{1/2}/T$	ft^5/s	$m^{0.5}/s$
C_1	أمثال خشونة هازان ويليامز	$L^{0.37}/T$	$ft^{0.37}/s$	$m^{0.37}/s$
d	العمق	L	ft	m
d_c	العمق الحرج	L	ft	m
D	القطر	L	ft	m
E	معامل المرونة	F/L^2	lb/in^2	MPa
F	القوة	F	lb	N
g	تسارع الجاذبية	L/T^2	ft/s^2	m/s^2
H	الحمولة الإجمالية، الحمولة على الهدّار	L	ft	m
h	الحمولة أو العلو المائي	L	ft	m
h_f	فقدان الحمولة الناشئ عن الاحتكاك	L	ft	m
L	الطول	L	ft	m
M	الكتلة	FT^2/L	$lb.s^2/ft$	Ns^2/m
n	أمثال خشونةماننغ	$T/L^{1/3}$	$s/ft^{1/3}$	$s/m^{1/3}$
P	طول محيط الهدّار، ارتفاع الهدّار	L	ft	m
P	القوة الناشئة عن الضغط	F	lb	N

الرمز	التسمية	الأبعاد	الواحدات المستخدمة في الولايات المتحدة (USCS)	الواحدات الدولية SI
p	الضغط	F/L^2	psf	MPa
Q	معدّل التدفق	L^3/T	ft^3/s	m^3/s
q	معدّل واحدة التدفق	$L^3/T.L$	$ft^3/(s.ft)$	$m^3/s.m$
r	نصف القطر	L	ft	m
R	نصف القطر الهيدروليكي	L	ft	m
T	الزمن	T	s	s
t	الزمن، السماكة	T, L	s, ft	s, m
V	السرعة	L/T	ft/s	m/s
W	الوزن	F	lb	kg
w	الوزن النوعي	F/L^3	lb/ft^3	kg/m^3
y	العمق في قناة مكشوفة، المسافة من الحد الصلب	L	ft	m
Z	الارتفاع عن المنسوب المرجعي	L	ft	m
ϵ	مقدار الخشونة	L	ft	m
μ	اللزوجة	FT/L^2	lb.s/ft	kg.s/m
ν	اللزوجة الحركية	L^2/T	ft^2/s	m^2/s
ρ	الكثافة	FT^2/L^4	$lb.s^2/ft^4$	$kg.s^2/m^4$
σ	الشد السطحي	F/L	lb/ft	kg/m
τ	إجهاد القص	F/L^2	lb/in^2	MPa

الجدول 12.1 /تابع/ الرموز والتسميات والأبعاد والواحدات المستخدمة في هندسة المياه.

الرمز	التسمية الإنكليزية	الأبعاد	الواحدات المستخدمة في الولايات المتحدة (USCS)	الواحدات الدولية SI
A	Area المساحة	L^2	ft^2	mm^2
C	أمثال خشونة تشيزي Chezy roughness coefficient	$L^{1/2}/T$	ft^5/s	$m^{0.5}/s$
C_1	أمثال خشونة هازان ويليامز Hazen-Williams roughness coefficient	$L^{0.37}/T$	$ft^{0.37}/s$	$m^{0.37}/s$
d	Depth العمق	L	ft	m
d_c	Critical depth العمق الحرج	L	ft	m
D	Diameter القطر	L	ft	m
E	Modulus of elasticity معامل المرونة	F/L^2	lb/in^2	MPa
F	Force القوة	F	lb	N
g	تسارع الجاذبية Acceleration due to gravity	L/T^2	ft/s^2	m/s^2
H	*الحمولة الإجمالية، الحمولة على الهدّار Total head, head on weir	L	ft	m
h	الحمولة أو العلو المائي Head or height	L	ft	m
h_f	فقدان الحمولة الناشئ عن الاحتكاك Head loss due to friction	L	ft	m
L	Length الطول	L	ft	m
M	Mass الكتلة	FT^2/L	$lb.s^2/ft$	Ns^2/m
n	أمثال خشونة مانينغ Manning's roughness coefficient	$T/L^{1/3}$	$s/ft^{1/3}$	$s/m^{1/3}$

الرمز	التسمية الإنكليزية	الأبعاد	الواحدات المستخدمة في الولايات المتحدة (USCS)	الواحدات الدولية SI
P	طول محيط الهدّار، ارتفاع الهدّار Perimeter, weir height	L	ft	m
P	القوة الناشئة عن الضغط Force due to pressure	F	lb	N
p	الضغط Pressure	F/L^2	psf	MPa
Q	معدّل التدفق Flow rate	L^3/T	ft^3/s	m^3/s
q	معدّل واحدة التدفق Unit flow rate	$L^3/T.L$	$ft^3/(s.ft)$	$m^3/s.m$
r	نصف القطر Radius	L	ft	m
R	نصف القطر الهيدروليكي Hydraulic radius	L	ft	m
T	الزمن Time	T	s	s
t	الزمن، السماكة Time, thickness	T, L	s, ft	s, m
V	السرعة Velocity	L/T	ft/s	m/s
W	الوزن Weight	F	lb	kg
w	الوزن النوعي Specific weight	F/L^3	lb/ft^3	kg/m^3
y	العمق في قناة مكشوفة، المسافة من الحد الصلب Depth in open channel, distance from solid boundary	L	ft	m
Z	الارتفاع عن المنسوب المرجعي Height above datum	L	ft	m
ϵ	مقدار الخشونة Size of roughness	L	ft	m
μ	اللزوجة Viscosity	FT/L^2	lb.s/ft	kg.s/m

الواحدات الدولية SI	الواحدات المستخدمة في الولايات المتحدة (USCS)	الأبعاد	التسمية الإنكليزية	الرمز
m^2/s	ft^2/s	L^2/T	اللزوجة الحركية Kinematic viscosity	ν
$kg.s^2/m^4$	$lb.s^2/ft^4$	FT^2/L^4	Density الكثافة	ρ
kg/m	lb/ft	F/L	Surface tension الشد السطحي	σ
MPa	lb/in^2	F/L^2	Shear stress إجهاد القص	τ

* يُقصد بالهدّار عموم أنواع الحواجز أو السدود المائية. (المعدّ)

رموز الكميات اللا بعدّية	
الكمية	الرمز
Weir coefficient, coefficient of discharge أمثال الهدّار، أمثال التصريف	C
Coefficient of contraction أمثال التضايق	C_c
Coefficient of velocity أمثال السرعة	C_v
Froude number عدد فرود	F
Darcy-Weisbach friction factor عامل احتكاك دارسي فايسباخ	f
Head-loss coefficient أمثال فقدان الحمولة	K
Reynolds number عدد رينولدز	R
Friction slope - slope of energy grade line ميل الاحتكاك - ميل خط تدرّج القدرة	S
Critical slope الميل الحرج	S_c
Efficiency المردود	η
Specific gravity الجاذبية النوعية	Sp. gr.

Capillary Action فعل الخاصة الشعريّة

تنشأ الخاصة الشعرية عن كل من قوى التماسك بين جزيئات السائل وقوى التلاصق لجزيئات السائل. إذ أنها تتوضح بفرق ارتفاعيْ سطح السائل فيما بين داخل وخارج أنبوب صغير له نهاية واحدة غاطسة في السائل (الشكل 12.1) ويُعبَّر عن خاصة الصعود الشعري عموماً بمقدار ارتفاع هذا الصعود. وذلك بمعادلة من الشكل:

$$h = \frac{2\sigma \mathrm{Cos}\theta}{(w_1 - w_2)r}$$

حيث:

h = الصعود الشعري، ft (m).

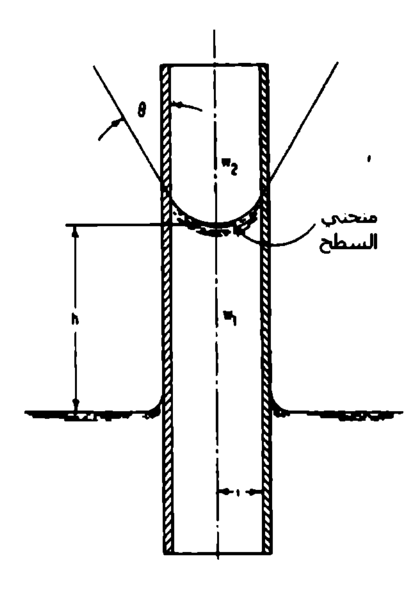
σ = الشد السطحي، lb/ft (N/m).

w_1 و w_2 = الوزن النوعي للسائل أسفل وأعلى السطح المقعر، على التوالي، lb/ft^3 (N/m^3)

θ = زأوية المماس

r = نصف قطر الأنبوب الشعري، ft (m).

يتناقص فعل الصعود الشعري - كما هو الحال في الشد السطحي - مع تزايد درجة الحرارة. ألا أن التغيرات الحرارية لهذه الخاصة تُعتبر في جميع الأحوال صغيرة وليس لها أي مدلول يذكر في معظم المسائل.



الشكل 12.1 فعل الصعود الشعري يرفع الماء في أنبوب ذي قطر صغير. منحني السطح أو سطح السائل يتقعر نحو الأعلى.

اللزوجة Viscosity

لزوجة سائل، وتدعى أيضاً بأمثال اللزوجة أو باللزوجة المطلقة أو باللزوجة الديناميكية، هي قياس ممانعة هذا السائل للجريان. ويُعبَّر عنها بنسبة إجهادات القص المماسية بين طبقات الجريان على معدّل تغيّر السرعة مع العمق:

$$\mu = \frac{\tau}{dV/dy}$$

حيث:

τ = إجهاد القص، lb/ft^2 (N/m^2).

V = السرعة، ft/s (m/s).

y = العمق، ft (m).

تتناقص اللزوجة بتزايد درجة الحرارة، إلا أنها قد تُعتبر مستقلة عن تغيرات الضغط في معظم المسائل الهندسية. لزوجة الماء عند 70° F (21.1° C) تساوي إلى 0.00002050 lb.s/ft^2 (0.00098 N.S/m^2).

تُعرَّف اللزوجة الحركية ν بأنها اللزوجة μ مقسومةً على الكثافة ρ. وقد سُمّيت بذلك لأن واحدها، ft^2/s (m^2/s)، ما هي إلا تركيباً من واحدة المسافة الحركية والزمن. اللزوجة الحركية للماء عند 70 °F (21.1 °C) تساوي إلى (0.000001 m^2/s) 0.00001059 ft^2/s.

تُواجه اللزوجة، في علم الهيدروليك، في معظم الأحيان أثناء حساب عدد رينولدز وذلك لتعيين إذا ما كان الجريان صفحياً أم انتقالياً أم جرياناً مضطرباً كلياً.

الضغط على السطوح المنحنية الغائصة تحت الماء

Pressure On Submerged Curved Surfaces

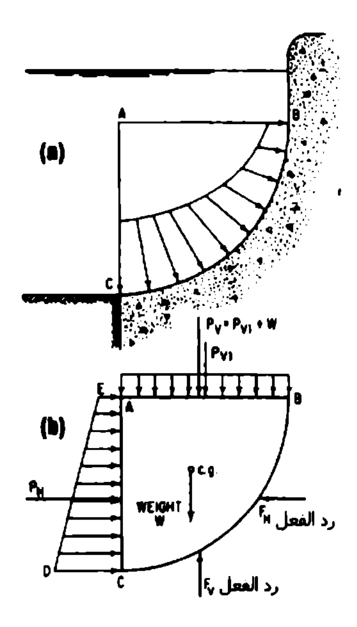
يُعطى الضغط الهيدروستاتيكي على سطح منحنٍ غائص (الشكل 12.2) بالعلاقة:

$$P = \sqrt{P_H^2 + P_V^2}$$

حيث: P = قوة الضغط الإجمالية على السطح.

P_H = القوة الناشئة عن الضغط الأفقي.

P_V = القوة الناشئة عن الضغط الرأسي.



الشكل 12.2 الضغط الهيدروستاتيكي على سطح منحنٍ غائص. (a) تغيُّر الضغط فوق السطح. (b) مخطط الجسم الحر (الطليق).

المبادئ الأساسية في جريان سائل

Fundamentals Of Fluid Flow

يتمثَّل قانون حفظ الطاقة، بما يخص طاقة سائل، بوساطة معادلة برنوللي:

$$Z_1 + \frac{p_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g}$$

حيث:

Z_1 = الارتفاع عند أي نقطة (1) من السائل الجاري فوق سطح مرجعي لا على التعيين، ft (m).

Z_2 = الارتفاع عند النقطة (2) باتجاه انحدار تيار السائل عن النقطة الأولى فوق نفس السطح المرجعي.

P_1 = الضغط عند النقطة (1)، lb/ft^2 (KPa).

P_2 = الضغط عند النقطة (2)، lb/ft^2 (KPa).

w = الوزن النوعي للسائل، lb/ft^3 (Kg/m^3).

V_1 = سرعة السائل عند النقطة (1)، ft/s (m/s).

V_2 = سرعة السائل عند النقطة (2)، ft/s (m/s).

g = تسارع الجاذبية، $32.2\ ft/s^2$ ($9.81\ m/s^2$).

يَجمَعُ الطرف الأيسر من المعادلة الطاقة الإجمالية بواحدة الوزن للسائل عند النقطة (1). بينما يَجمَعُ الطرف الأيمن الطاقة الإجمالية بواحدة الوزن عند النقطة (2). تطبَّق المعادلة السابقة فقط على السائل المثالي، حيث يتطلب تطبيقها العملي إضافة حدٍّ يُفسِّر تناقص الحمولة الإجمالية بسبب الاحتكاك ft (m).

وعندما يُضاف هذا الحد h_f، إلى طرف المعادلة الخاص باتجاه انحدار التيار، فإنه يعطي شكلاً مستخدماً على نطاق واسع لمعادلة برنوللي:

$$Z_1 + \frac{p_1}{w} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{w} + \frac{V_2^2}{2g} + hf$$

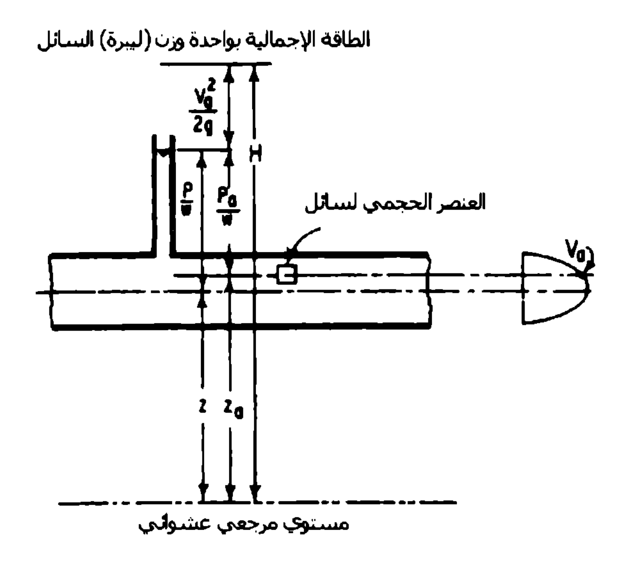
وهكذا، فإن الطاقة المتضمَّنة أو التي يحملها عنصر حجمي من سائل تكون تابعة لارتفاعه وسرعته وضغطه (الشكل 12.3). فالطاقة الناشئة عن الارتفاع هي الطاقة الكامنة وتساوي WZ_a، حيث: W وزن السائل في الحجم العنصري، lb (kg). وZ_a ارتفاع الحجم العنصري فوق سطح مرجعي لا على التعيين، ft (m). والطاقة الناشئة عن السرعة هي الطاقة الحركية وتساوي $WV_a^2/2g$، حيث: V_a سرعة الحجم العنصري، ft/s (m/s). أما الطاقة الناشئة عن الضغط (طاقة الضغط) فتساوي $W\,p_a/w$، حيث p_a الضغط، lb/ft^2 (Kg/kPa) و w الوزن النوعي للسائل، (kg/m^3) lb/ft^3. وتكون الطاقة الإجمالية في الحجم العنصري من سائل:

$$E = WZ_a + \frac{Wp_a}{\omega} + \frac{WV_a^2}{2g}$$

وبتقسيم طرفي المعادلة على W تنتج الطاقة بواحدة وزن السائل الجاري، أو الحمولة الإجمالية ft (m):

$$H = Z_a + \frac{p_a}{\omega} + \frac{V_a^2}{2g}$$

يدعى الحد p_a/w حمولة الضغط، ويدعى الحد $V_a^2/2g$ حمولة السرعة.



الشكل 12.3. اعتماد الطاقة، في سائل، على الارتفاع والسرعة والضغط.

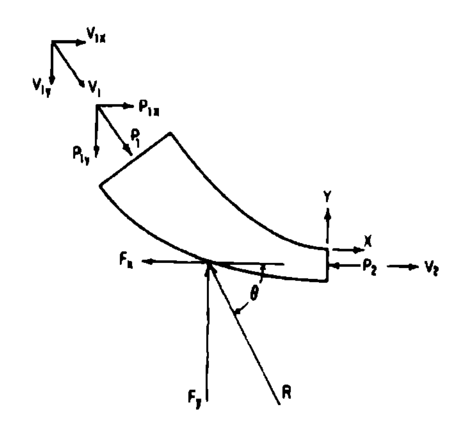
وفق ما هو مُبيَّن في الشكل 12.3 يكون المجموع $Z + p/w$ ثابتاً من أجل أي نقطة في مقطعٍ عرضي وناظمياً على اتجاه الجريان في أنبوب أو قناة. وعلى أي حال، تتغير القدرة الحركية في المقطع مع تغير السرعة. يؤخذ عادةً المجموع $Z + p/w$ في النقطة الوسطية والسرعة الوسطية من المقطع عندما تُطبَّق معادلة برنوللي على الجريان عبر المقطع أو عندما يتوجب تعيين الحمولة الإجمالية. وتساوي السرعة الوسطية مقدرة بـــ ft/s (m/s) إلى Q/A، حيث: Q كمية الجريان المقدرة بـــ ft^3/s (m^3/s) عبر مساحة المقطع A المقدرة بـــ ft^2 (m^2).

كمية الحركة هي المفهوم الأساسي الذي لابد من اعتباره أمراً جوهريّاً في تصميم جميع تمديدات الأعمال المائية التي تتضمن جريان سائل. إذ أن تغيراً في كمية الحركة، الذي قد ينتج من تغير في السرعة أو الاتجاه أو من تغير كمية الجريان،

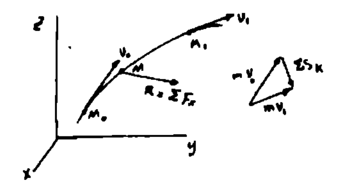
يساوي إلى دفع القوة، وهو القوة F الفاعلة في سائل مضروبة بالفترة الزمنية dt التي تفعل بها أو خلالها*. (الشكل 12.4).

وبتقسيم التغيُّر الإجمالي في كمية الحركة على المجال الزمني الذي يحدث فيه التغير تنتج معادلة كمية الحركة أو معادلة كمية الحركة - الدفع:

$$F_x = \rho\, Q\, \Delta V_x$$



الشكل 12.4 مخطط القوى الخاص بكمية الحركة.



* تُعطى علاقة دفع القوى في الميكانيك النظري بـــ:

$$mv_1 - mv_0 = \sum \int_0^{t_1} F dt$$

ومكاملة الطرف الأيمن هو دفع القوة S خلال فترة زمنية محددة:

$$mv_1 - mv_0 = \sum S$$

ويعني أن التغيّر في كمية حركة جزيئة خلال مجال زمني ما يساوي إلى مجموع دفوع كل القوى الفاعلة على الجزيئة خلال ذلك المجال الزمني. (المعدّ)

حيث:

F_x = مجموع كل القوى وفق الاتجاه X بواحدة الزمن التي تتسبب بتغيير كمية الحركة في الاتجاه X، lb (N).

ρ = كثافة السائل الجاري، $lb.s^2/ft^4$ $(kg.s^2/m^4)$ (الوزن النوعي مقسوماً على g).

Q = معدّل الجريان، ft^3/s (m^3/s)، (التدفق).

ΔV_x = التغير في السرعة وفق الاتجاه X، ft/s (m/s).

ويمكن كتابة المعادلات المشابهة بما يخصُّ الاتجاهين Y وZ.

غالباً ما يتم استخدام معادلة كمية الحركة - الدفع بالترافق مع معادلة برنوللي، كما يمكن استخدامها بمفردها.

المماثلة (المقارنة) بالنماذج الفيزيائية

Similitude For Physical Models

النموذج الفيزيائي (الموديل) هو النظام الذي يمكن استخدام عملية تشغيله في تكهن الصفات المميزة لنظام مشابه أو لمنشأة بدائية تكون عادةً أكثر تعقيداً أو مبنية بمقياس أكبر بكثير من ذلك النموذج.

تُعيّن نسب قوة الجاذبية وقوة اللزوجة وقوة الشد السطحي، إلى قوة العطالة، عددَ فرود وعدد رينولدز وعدد ويبر على التوالي. وبمساواة عدد فرود للنموذج مع عدد فرود للمنشأة البدائية يتم التأكد من أن قوتي التجاذب والعطالة من نفس التناسب. وعلى نحوٍ مشابه، بمساواة عدد رينولدز للنموذج مع عدد رينولدز للمنشأة البدائية يتم التأكدُ من أن قوتي اللزوجة والعطالة تناسبيتان. وكذلك الأمر، بمساواة عدديْ ويبر (للنموذج والمنشأة البدائية) يتم التأكد من تناسبية قوتيّ الشد السطحي والعطالة.

يعطى عدد فرود ـــ Froude بـــــ:

$$F = \frac{V}{\sqrt{Lg}}$$

حيث:

F = عدد فرود (لا بعدي).

V = سرعة السائل، ft/s (m/s).

L = البعد الخطي أو الطولي (خاصة مميزة (معيار) للعمق أو للقطر مثلاً) ft (m).

g = تسارع الجاذبية، $32.2\ ft/s^2$ ($9.81\ m/s^2$).

وتكون القوتان السائدتان في المنشآت الهيدروليكية مثل الهدارات والمفيضات - حيث يوجد تغير مفاجئ في المقطع الجانبي من السطح المائي - هما قوتا العطالة والجاذبية. لهذا السبب يكون عددا فرود للنموذج والمنشأة البدائية متساويين:

$$\frac{V_m}{\sqrt{L_m g}} = \frac{V_p}{\sqrt{L_p g}} \qquad \Leftarrow \qquad F_m = F_p$$

حيث يُطبَّق الدليل السفلي m على النموذج ويطبَّق الدليل السفلي p على المنشأة البدائية.

يعطى عدد رينولدز - Reynolds بـــ:

$$R = \frac{VL}{\nu}$$

حيث:

R = عدد رينولدز (لا بعدي).

ν = اللزوجة الحركية للسائل، ft^2/s (m^2/s).

ويكون عددا رينولدز للنموذج والمنشأة البدائية متساويين عندما تكون قوتا اللزوجة والعطالة هما المسيطرتان. وتكون عادةً قوى اللزوجة هي المسيطرة عندما يحدث الجريان في نظام مغلق مثل الجريان الأنبوبي حيث ليس هناك سطح حر. يتم الحصول على المعادلات التالية بمساواة عدديْ رينولدز للنموذج والمنشأة البدائية:

$$\frac{V_m L_m}{\nu_m} = \frac{V_p L_p}{\nu_p} \qquad ; \qquad V_r = \frac{\nu_r}{L_r}$$

العاملان المتحولان اللذان يُثبِّتان تصميماً لنموذج واقعي، عندما يكون عدد رينولدز متحكماً بالأمر، هما النسبة الطولية ونسبة اللزوجة (بين النموذج والمنشأة البدائية).

يُعطى عدد ويبر – weber بـــ:

$$W = \frac{V^2 L \rho}{\sigma}$$

حيث:

ρ – كثافة السائل، $lb.s^2/ft^4$ $(kg.s^2/m^4)$ (الوزن النوعي مقسوماً على g).

σ – الشد السطحي للسائل، lb/ft^2 (KPa).

ويتساوى عددا ويبر للنموذج والمنشأة البدائية في نماذج معينة من دراسات الأمواج.

غالباً ما يعتمد تصميم النماذج، بما يخص جريان المياه في الأقنية المكشوفة والأنهار حيث يكون ميل سطح الاحتكاك مُنبسطاً (أفقياً) نسبياً، على معادلة مانينغ – Manning equation.

فيتم تعيين العلاقة بين النموذج والمنشأة البدائية وفق ما يلي:

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{(1.486/n_m)R_m^{2/3}S_m^{1/2}}{(1.486/n_p)R_p^{2/3}S_p^{1/2}}$$

حيث:

n = أمثال خشونة مانينغ ($T/L^{1/3}$، و T تُمثّل الزمن).

R = نصف القطر الهيدروليكي (L).

S = ضياع أو فقدان الحمولة الناشئ عن الاحتكاك بواحدة الطول من الناقل المائي (لا بعدي).

وفي النماذج الواقعية يكون:

$$S_r = 1 \, , \, R_r = L_r$$

وبالتالي:

$$V_r = \frac{L_r^{2/3}}{n_r}$$

ويكون من الضروري في نماذج الأنهار والأقنية المكشوفة أن يؤخذ الجريان مضطرباً.

وقد حددت محطة تجارب المسارات المائية* في الولايات المتحدة أن الجريان يكون مضطرباً إذا كان:

$$\frac{VR}{v} \geq 4000$$

حيث:

V = السرعة الوسطية، ft/s (m/s).

R = نصف القطر الهيدروليكي، ft (m).

v = اللزوجة الحركية، ft^2/s (m^2/s).

* المقصود بالمسارات المائية أي مجرى أو مسار يحمل الماء. Waterways. (المعدّ).

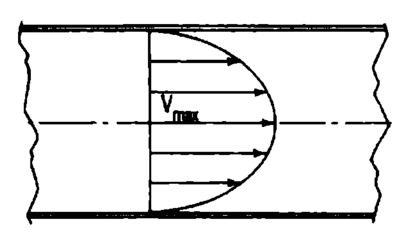
إلاّ أنه إذا كان النموذج نموذجاً واقعياً** ، فقد يحدث ألّا يكون اقتصادياً بما يخص الجريان المضطرب!!.

جريان سائل في أنبوب. Fluid Flow In Pipes

الجريان الصفحي

تتحرك جزيئات السائل، في الجريان الصفحي، على شكل طبقات متوازية باتجاه واحد.

يخلق منحني توزيع السرعة الذي له شكل قطع مكافئ والموضح في الشكل 12.5، إجهاداً قصياً τ يُعطى بالعلاقة: $\tau = \mu \frac{dV}{dy}$ ، حيث: dv/dy معدّل تغير السرعة مع العمق. وμ أمثال اللزوجة. ومع تزايد إجهاد القص هذا، تغدو قوى اللزوجة غير قادرة على إخماد الاضطرابات والقلاقل في السائل، مما يودي إلى حدوث جريان مضطرب. وتعتمد منطقة تحوّل الجريان على سرعة السائل وكثافته ولزوجته وكذا على قياس ناقل السائل.



الشكل 12.5 شكل توزع السرعة في الجريان الصفحي هو منحني قطع مكافئ في أنبوب ذي مقطع دائري. السرعة العظمى أكبر بمرتين من السرعة الوسطية.

** النموذج الواقعي هو النموذج المطابق تماماً للحالة الواقعية. (المعدّ).

الوسيط اللابعدي المُسمَّى بعدد رينولدز قد تمّ إيجاده ليكون معياراً موثوقاً في تحديد إذا ما كان الجريان صفحياً أم مضطرباً. وهو نسبة قوى العطالة على قوى اللزوجة، ويُعطى بالعلاقة:

$$\mathbf{R} = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu}$$

حيث:

V = سرعة السائل، ft/s (m/s).

D = قطر الأنبوب، ft (m).

ρ = كثافة السائل، $lb.s^2/ft^4$ ($kg.s^2/m^4$) (الوزن النوعي مقسوماً على g، $32.2\ ft/s^2$).

μ = لزوجة السائل، $lb.s/ft^2$ ($kg.s/m^2$).

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ = اللزوجة الحركية، ft^2/s (m^2/s).

ويكون الجريان في الأنابيب الدائرية صفحياً إذا كان عدد رينولدز أقل من 2000.

أما عندما يكون عدد رينولدز أكبر من 2000 فإن الجريان الصفحي يصير قلقاً. وحدوث قلق وفوضى في السائل أكبر من ذلك، سيؤدي بالجريان لأن يكون مضطرباً.

يمكن أن تتوضح المعادلة اللاحقة، المتعلقة بضياع الحمولة الناشئة عن الاحتكاك في الجريان الصفحي، بأخذ القوى الفاعلة على اسطوانة من السائل ضمن الأنبوب:

$$h_f = \frac{32\mu LV}{D^2\rho g} = \frac{32\mu LV}{D^2 w}$$

حيث:

h_f = ضياع الحمولة بسبب الاحتكاك، ft (m).

L = طول المقطع في الأنبوب المُعْتَبر، ft (m).

g = تسارع الجاذبية، $32.2\ ft/s^2$ ($9.81\ m/s^2$).

w = الوزن النوعي للسائل، lb/ft^3 (Kg/m^3)

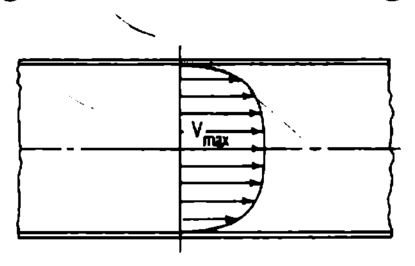
وبتعويض عدد رينولدز ينتج:

$$h_f = \frac{64}{R}\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

تتطابق المعادلة السابقة في الجريان الصفحي مع صيغة دارسي – فايسباخ (Darcy - Weisbach) وذلك لأنه في الجريان الصفحي يساوي الاحتكاك؛ $f = \frac{64}{R}$.

الجريان المضطرب

تغدو قوى العطالة في الجريان المضطرب كبيرة جداً إلى حد لا تستطيع فيه قوى اللزوجة إخماد الاضطرابات الناشئة أساساً عن خشونة السطح. وتخلق هذه الاضطرابات دوامات لها سرعة دورانية وأخرى انتقالية. ويقوم انتقال هذه الدوامات بفعل المزج الذي ينتج تبادلاً في كمية الحركة عبر المقطع العرضي للناقل. وبالمحصلة، يكون توزع السرعة أكثر انتظاماً وفق ما هو موضح في الشكل 12.6.



الشكل 12.6 توزع السرعة في الجريان المضطرب ضمن أنبوب دائري يكون أكثر انتظاماً تقريباً من ذلك التوزع في الجريان الصفحي.

لقد بيّنت التجارب على الجريان المضطرب أن:

- تغيّر ضياع الحمولة مرتبط مباشرة مع تغيُّر طول الأنبوب.
- تغيّر ضياع الحمولة متعلق على الأغلب مع تغيُّر مربع السرعة.
- تغير ضياع الحمولة متعلق على الأغلب عكساً مع تغيّر نصف القطر.
- يعتمد ضياع الحمولة على خشونة سطح جدار الأنبوب.
- يعتمد ضياع الحمولة على كثافة السائل ولزوجته.
- ضياع الحمولة مستقل عن الضغط.

Darcy-Weisbach Formula صيغة دارسي ـ فايسباخ

إنّ إحدى أكثر المعادلات استخداماً في جريان السوائل ضمن الأنابيب هي صيغة دارسي – فايسباخ التي تحقق الشرط المُحدَّد في المقطع السابق وتكون قابلة للتطبيق على الجريان الصفحي والمضطرب في جميع أنواع السوائل:

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

حيث:

h_f = ضياع الحمولة الناتج عن الاحتكاك، ft (m).

f = عامل الاحتكاك (راجع أي كتاب هندسي مساعد).

L = طول الأنبوب، ft (m).

D = قطر الأنبوب، ft (m).

V = سرعة السائل، ft/s (m/s).

g = تسارع الجاذبية، $32.2\ ft/s^2$ ($9.81\ m/s^2$).

وتستخدم العلاقة السابقة مخطط الـــ Moody لحساب قيمة عامل الاحتكاك f.

(Moody, L. F. "عوامل احتكاك الجريان الأنبوبي" محاضر اجتماع الجمعية الأميريكية للمهندسين الميكانيكيين، تشرين الثاني 1944.)

(Moody, L. F., "Friction Factors for Pipe Flow," Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, November 1944.)

وبما أن المعادلة السابقة متجانسة بعدياً، فيمكن استخدامها مع أي مجموعة أخرى متجانسة من الواحدات دون تغيُّر قيمة عامل الاحتكاك.

قيم الخشونة ∈، المقدرة بـــ ft (m)، والمتعلقة باستخدام مخطط الـــ Moody لتعيين عامل احتكاك دارسي - فايسباخ، تمَّ سردها في المراجع الهندسية المساعدة.

الصيغ اللاحقة أُشتقت من أجل فقدان الحمولة في تصاميم الأعمال المائية، وهي تعطي نتائجاً حسنة بما يخص حسابات شبكات نقل وتوزيع المياه.

فهي تتضمن العامل الذي يعتمد على خشونة السطح لمادة الأنبوب. وتتأثر دقة هذه الصيغ كثيراً بانتقاء عامل الخشونة الذي يتطلب مهارة وخبرة في اختياره.

صيغة تشزي Chezy Formula

تتحقق هذه المعادلة من أجل فقدان الحمولة في الأقنية، وتعطي نتائجاً جيدة ومنطقية بالنسبة لأعداد رينولدز الكبيرة:

$$V = C\sqrt{RS}$$

حيث:

V = السرعة، ft/s (m/s).

C = أمثال، يعتمد على خشونة سطح القناة.

S = ميل خط تدرّج القدرة، أو ضياع الحمولة الناتج عن الاحتكاك في القناة، ft/ft (m/m).

R = نصف القطر الهيدروليكي، ft (m).

نصف القطر الهيدروليكي للناقل هو مساحة المقطع العرضي للسائل الموجود فيه مقسوماً على طول المحيط المبلول من المقطع.

صيغة مانينغ Manning's Formula

استنتج مانينغ من خلال التجارب أن C في معادلة تشيزي يجب أن تتغير عند $R^{1/6}$:

$$C = \frac{1.486R^{1/6}}{n}$$

حيث:

n = أمثال، يعتمد على خشونة السطح. (رغم اعتماده على خشونة السطح، إلا أن n يُعامل في بعض التطبيقات كوسيط مُجمّع لكل ضياعات الحمولة).

بتعويض قيمة C هذه في صيغة تشيزي السابقة:

$$V = \frac{1.486}{n}R^{2/3}S^{1/2}$$

وباستبدال المقدار $\frac{D}{4}$ بنصف القطر الهيدروليكي للأنبوب يتم الحصول على المعادلات التالية الخاصة بالجريان الأنبوبي المليء، حيث D قطر الأنبوب:

$$V = \frac{0.590}{n} D^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = \frac{0.463}{n} D^{8/3} S^{1/2}$$

$$h_f = 4.66 n^2 \frac{LQ^2}{D^{16/3}}$$

$$D = \left(\frac{2.159 Qn}{S^{1/2}} \right)^{3/8}$$

حيث:

Q - كمية الجريان (التدفق)، ft^3/s (m^3/s).

صيغة هازن- ويليامز Hazen - Williams Formula

تُعتبر هذه الصيغة واحدة من أكثر الصيغ استخداماً في حسابات الجريان الأنبوبي في مصالح خدمات المياه، بالرغم من أنها قد طورت أصلاً لكي تُستخدم في كل من الجريان في الأقنية المكشوفة وفي الأنابيب أيضاً:

$$V = 1.318 C_1 R^{0.63} S^{0.54}$$

وبما يخص الجريان الأنبوبي المليء:

$$V = 0.55 C_1 D^{0.63} S^{0.54}$$

$$Q = 0.432 C_1 D^{2.63} S^{0.54}$$

$$h_f = \frac{4.727}{D^{4.87}} L \left(\frac{Q}{C_1} \right)^{1.85}$$

$$D = \frac{1.376}{S^{0.205}} \left(\frac{Q}{C_1} \right)^{0.38}$$

حيث:

V = السرعة، ft/s ‏(m/s).

C_1 = أمثال، يعتمد على خشونة السطح (يُعطى في المراجع الهندسية المساعدة).

R = نصف القطر الهيدروليكي، ft ‏(m).

S = ضياع الحمولة الناتج عن الاحتكاك في الأنبوب، ft/ft ‏(m/m).

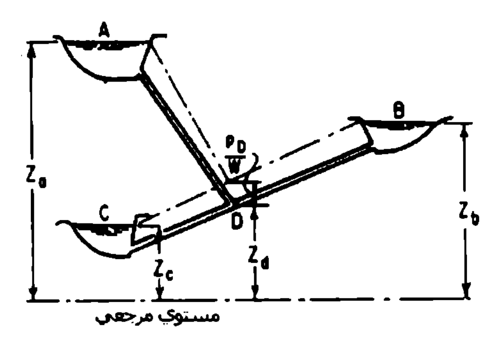
D = قطر الأنبوب، ft ‏(m).

L = طول الأنبوب، ft ‏(m).

Q = كمية التصريف (التدفق)، ft^3/s ‏(m^3/s).

h_f = الضياع بالاحتكاك، ft ‏(m).

يوضح الشكل 12.7 مسألة ثلاثية الأحواض نموذجية. تتساوى ارتفاعات خطوط التدرج الهيدروليكي للأنابيب الثلاثة عند النقطة D. ويمكن كتابة معادلة هازن ويليامز للضياع بالاحتكاك من أجل كل أنبوب عند نقطة الالتقاء D.



الشكل 12.7 الجريان فيما بين الأحواض

وبمساعدة معادلة الاستمرار الخاصة بكمية الجريان، يوجد هنالك معادلات بقدر ما يوجد من مجاهيل:

$$Z_a = Z_d + \frac{p_D}{w} + \frac{4.727 L_A}{D_A^{4.87}} \left(\frac{Q_A}{C_A} \right)^{1.85}$$

$$Z_b = Z_d + \frac{p_D}{w} + \frac{4.727 L_B}{D_B^{4.87}} \left(\frac{Q_B}{C_B} \right)^{1.85}$$

$$Z_c = Zd + \frac{p_C}{w} + \frac{4.727 L_C}{D_C^{4.87}} \left(\frac{Q_C}{C_C} \right)^{1.85}$$

$$Q_A + Q_B = Q_C$$

حيث:

P_D = الضغط عند D؛ w = واحدة الوزن للسائل.

تغيرات الضغط (الحمولة) بسبب تغير قياس الأنبوب

Pressure (Head) Changes Caused By Pipe Size Change

تحدث ضياعات الطاقة في تضايقات الأنابيب والإنثناءات والتوسعات وفي السكور ووصلات الأنابيب الأخرى أيضاً. ويمكن لهذه الضياعات أن تُحذف عادةً في حال كان الخط الأنبوبي أكبر من قطر الأنبوب بـــ 1500 مرة.

وعلى أي حال، لابد من أخذ الضياعات الثانوية في الحسبان في خطوط الأنابيب القصيرة، لأن هذه الضياعات قد تتجاوز ضياعات الاحتكاك.

التوسعات الفجائية

المعادلة اللاحقة، الخاصة بضياع الحمولة عبر التوسع المفاجئ في قطر الأنبوب، تمّ تعيينها بطريقة تحليلية وهي تتوافق تماماً مع النتائج التجريبية:

$$h_L = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

حيث:

V_1 = السرعة قبل التوسّع، ft/s (m/s).

V_2 = السرعة بعد التوسّع، ft/s (m/s).

g = تسارع الجاذبية، $32.2\ ft/s^2$ ($9.81\ m/s^2$).

لقد كان اشتقاقها عن طريق تطبيق معادلة برنوللي ومعادلة كمية الحركة عبر توسع ما.

المعادلة الأخرى الخاصة بضياع الحمولة بسبب التوسعات المفاجئة تمّ تعيينها تجريبياً من قبل آركر (Archer). وتعطي هذه المعادلة توافقاً أفضل بقليل مع النتائج التجريبية مما تعطيه المعادلة السابقة:

$$h_L = \frac{1.1(V_1 - V_2)^{1.92}}{2g}$$

تطبَّق المعادلتان السابقتان على نحوٍ خاص في حالة التصريف من أنبوب إلى حوض. حيث لا يكون للماء سرعة في الحوض، مما يعني فقدان أو ضياع حمولة السرعة بمجملها.

التوسعات التدرُجيّة

تأخذ معادلة ضياع الحمولة الناتجة عن التوسع التدريجي المخروطي لأنبوب الشكل التالي:

$$h_L = \frac{K(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

حيث:

K = أمثال الضياع، وفق ما يُعطى في الكتب الهندسَية المساعدة.

التضايق المفاجئ

لقد تم تعيين المعادلة التالية لضياع الحمولة عبر التضايق المفاجئ لأنبوب بوساطة نفس نموذج الدراسات التحليلية بـــ:

$$h_L = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 \frac{V^2}{2g}$$

حيث:

C_c = أمثال التضايق.

V = السرعة في الأنبوب ذي القطر الأصغر، ft/s ‏(m/s).

وتعطي هذه المعادلة أفضل النتائج في حال كان ضياع الحمولة أكبر من 1 ft ‏(0.3 m).

الصيغة الأخرى المتعلقة بتحديد فقدان الحمولة بسبب التضايق المفاجئ، تمّ تعيينها تجريبياً من قبل برايتمور (Brightmore) بـــ:

$$h_L = \frac{0.7(V_1 - V_2)^2}{2g}$$

وتعطي هذه المعادلة أفضل النتائج إذا كان ضياع الحمولة أقل من 1 ft ‏(0.3 m).

الحالة الخاصة لضياع التضايق المفاجئ هي حالة ضياع الدخول إلى الأنابيب. وقد تمّ سرد بعض القيم النموذجية لأمثال الضياع K، في العلاقة $h_L = K\ V^2/2g$، في المراجع الهندسية المساعدة. حيث V سرعة السائل في الأنبوب.

ضياعات الإنثناءات والوصلات النظامية

يُعطى ضياع الحمولة الذي يحدث في وصلات الأنابيب مثل السكور والأكواع وعند مواضع الانثناء بـــ:

$$h_L = \frac{KV^2}{2g}$$

وللحصول على الضياعات في الانثناءات باستثناء الإنثناء 90° يمكن استخدام الصيغة التالية لتعديل قيم K:

$$K' = K\sqrt{\frac{\Delta}{90}}$$

حيث:

Δ = زاوية الانحراف أو الانثناء بالدرجات.

تُعطى قيم K عادة في الكتب الهندسية المساعدة.

الجريان من خلال الفوّهات Flow Through Orifices

الفُوَّهة هي فتحة ذات محيط مغلق يجري من خلالها الماء. ويمكن للفوهات أن تأخذ أي شكل بالرغم من أنها تكون عادةً دائرية أو مربعة أو مستطيلة.

تصريف الفوهة إلى الهواء الحر

يمكن أن يُحسب التصريف (التدفق) من خلال فوهة حادة الحواف من العلاقة:

$$Q = Ca\sqrt{2gh}$$

حيث:

Q = التدفق، ft^3/s (m^3/s).

C = أمثال التدفق.

a = مساحة الفوهة، ft/s^2 (m^2).

g = تسارع الجاذبية، ft/s^2 (m/s^2).

h = الحمولة فوق الخط المركزي الأفقي للفوهة، ft (m).

تُعطى أمثال التصريف C في المراجع الهندسية المساعدة من أجل سرعة خروج منخفضة. أمّا في حال كان لهذه السرعة قيمة ذات مدلول (كبيرة إلى حدٍّ ما) فيجب أن يؤخذ تأثيرها في الحسبان.

إن الصيغة السابقة قابلة للتطبيق من أجل أي حمولة يكون من أجلها أمثال التصريف معلوماً. ففي حالة الحمولات المنخفضة، لا يكون قياس الحمولة من خط مركز الفوهة صحيحاً نظرياً. إلا أن هذا الخطأ يُصحَّح بوساطة قيم C بطبيعة الحال.

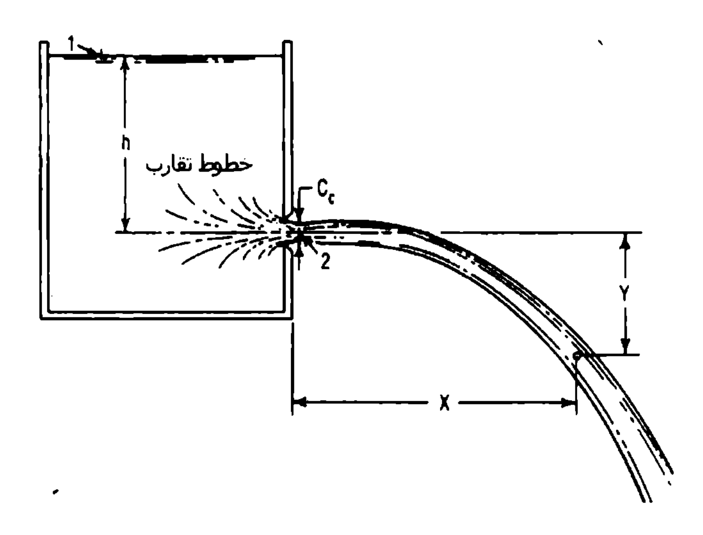
يساوي أمثال التصريف C إلى جداء أمثال السرعة C_V بأمثال التضايق C_C.

وأمثال السرعة C_V هو النسبة التي يتم الحصول عليها بتقسيم السرعة الفعلية عند نقطة تضايق النافورة (ظاهرة اختناق أو انكماش النفث المُصرَّف) على السرعة النظرية. ويمكن حساب السرعة النظرية عن طريق كتابة معادلة برنوللي عند النقطتين (1) و(2) المبينتين في الشكل 12.8.

$$\frac{V_1^2}{2g}+\frac{p_1}{w}+Z_1=\frac{V_2^2}{2g}+\frac{p_2}{w}+Z_2$$

وبأخذ المستوي المرجعي ماراً من النقطة (2)، تصير:

$$Z_1 = h;\ V_1 = 0;\ p_1/w = p_2/w = 0;\ Z_2 = 0$$



الشكل 12.8. نافورة السائل تأخذ مسار قطع مكافئ.

وتصبح المعادلة السابقة:

$$V_2 = \sqrt{2gh}$$

أمثال التضايق C_c هو نسبة المساحة الأصغرية من النافورة (منطقة الانكماش) على مساحة الفوهة. يحدث تضايق نفث السائل إذا كانت الفوهة حادة الحواف وواقعة في مكان تصنع فيه خطوط تقارب خروج السائل من الفوهة زاوية ما مع اتجاه الجريان من خلال الفوهة (انظر الشكل 12.8).

الفوهات الغائصة

يمكن أن يُحسب الجريان من خلال الفوهة الغائصة بتطبيق معادلة برنوللي على النقطتين (1) و(2) في الشكل 12.9.

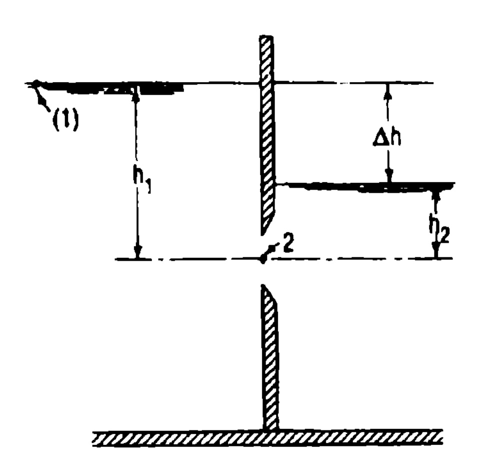
$$V_2 = \sqrt{2g\left(h_1 - h_2 + \frac{V_1^2}{2g} - h_L\right)}$$

حيث:

h_L = ضياعات الحمولة بين النقطتين (1) و(2)، ft (m).

وبافتراض أن $V_1 = 0$، وبوضع: $h_1 - h_2 = \Delta h$، وباستخدام أمثال التصريف C لتبيين الضياعات، عند ذلك يتم الحصول على المعادلة التالية:

$$Q = Ca\sqrt{2g\Delta h}$$



الشكل 12.9 التدفق من خلال فوّهة غائصة.

لا تختلف قيم C الخاصة بالفوهات الغائصة كثيراً عن تلك العائدة للفوّهات اللاغائصة.

التصريف تحت ظرف هبوط الحمولة

يُمثّل الجريان من حوض أو إناء، عندما يكون الجريان الداخل أقل من الجريان الخارج، حالة هبوط الحمولة. ويمكن أن يُحسب الزمن المطلوب لدفق كمية معينة من الماء من الحوض بمساواة حجم الماء الذي يخرج من خلال الفوهة أو الأنبوب مع حجم التناقص في الحوض خلال الزمن dt. فإذا كانت مساحة الحوض ثابتة يمكن كتابة:

$$t = \frac{2A}{Ca\sqrt{2g}}(\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2})$$

حيث:

h_1 = الحمولة عند البداية، ft (m).

h_2 = الحمولة عند النهاية، ft (m).

A = مساحة الحوض الثابتة، ft^2 (m^2).

t = المجال الزمني لهبوط الحمولة من h_1 إلى h_2، S.

نوافير السوائل Fluid Jets

يتبع خط دفق سائل من خلال فوهة إلى الهواء مسار قذيفة، على اعتبار أن تأثير ممانعة الهواء صغير. وتساوي السرعة الابتدائية لدفق السائل من النافورة إلى:

$$V_o = C_V\sqrt{2gh}$$

حيث:

h = الحمولة فوق خط مركز الفوهة، ft (m).

C_V = أمثال السرعة.

يعتمد اتجاه السرعة الابتدائية على وجهة السطح الذي تقع فيه الفوّهة.

وبغرض التبسيط، تم تعيين المعادلات التالية بافتراض أن الفوّهة واقعة في سطح شاقولي (انظر الشكل 12.8). فتظل سرعة دفق السائل في الاتجاه X (الاتجاه الأفقي) ثابتة:

$$V_x = V_o = C_v\sqrt{2gh}$$

وتكون السرعة الابتدائية في الاتجاه Y مساوية للصفر، وفيما بعد تصبح تابعة للزمن ولتسارع الجاذبية:

$$V_y = gt$$

تساوي المسافة باتجاه الإحداثي X عند اللحظة t إلى:

$$X = V_x t = tCv\sqrt{2gh}$$

وتساوي المسافة باتجاه الإحداثي Y إلى:

$$Y = V_{avg}\, t = \frac{gt^2}{2}$$

حيث:

V_{avg} = السرعة الوسطية على امتداد الفترة الزمنية t.

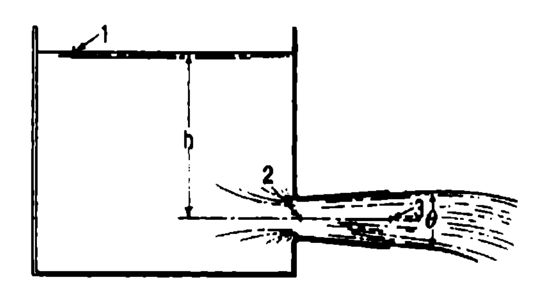
معادلة مسار نفث أو دفق السائل:

$$X^2 = C_v^2\, 4hy$$

دفق فوّهة ضمن أنابيب مخروطية متباعدة

Orifice Discharege Into Diverging Conical Tubes

يمكن لهذا النوع من الأنابيب أن يزيد بصورة كبيرة الجريان من خلال الفوّهة عن طريق تخفيض الضغط الجوي على الفوّهة الواقعة تحت تأثيره.



الشكل 12.10 أنبوب مخروطي متباعد يزيد الجريان من الحوض من خلال فوهة بتخفيض الضغط الجوي عليها.

الصيغة التي تُتّبع لحساب الضغط عند نقطة الدخول إلى الأنبوب يتم الحصول عليها بكتابة معادلة برنوللي عند النقطتين (1) و(3) وكذلك عند النقطتين (1) و(2) وفق ما هو واضح في الشكل 12.10:

$$p_2 = wh\left[1-\left(\frac{a_3}{a_2}\right)^2\right]$$

حيث:

p_2 = الضغط المُقاس المغاير للضغط الجوي في مدخل الأنبوب، lb/ft^2 (Pa).

w = وزن واحدة الحجم الماء، lb/ft^3 (kg/m^3).

h = الحمولة فوق خط مركز الفوّهة، ft (m).

a_2 = مساحة أصغر جزء من النافورة (مساحة منطقة التضايق إن وجدت)، ft^2 (m^2).

a_3 = مساحة دفق نهاية الأنبوب، ft^2 (m^2).

ويحسب التدفق أيضاً بكتابة معادلة برنوللي عند النقطتين (1) و(3) الموضحتين في الشكل 12.10.

لكي تكون عملية الحساب التحليلية هذه محققة (صحيحة) يجب أن يكون الأنبوب تام الجريان (مقطعه مليء) ويجب ألّا يهبط الضغط في منطقة اختناق (تضايق) الأنبوب عن ضغط بخار الماء. وتوضح التجارب بأنبوب الفنتوري (Venturi) أن الزاوية الأكثر فاعلية θ تكون قريبة من $5°$.

المطرقة المائية (الصدمة الهيدروليكية) Water Hammer

المطرقة المائية إن هي إلّا تغيراً في الضغط يفوق أو يقل عن الضغط الطبيعي، سببه تغيّر مُعدّل الجريان في الأنبوب.

تساوي معادلة سرعة موجة في أنبوب إلى:

$$U = \sqrt{\frac{E}{\rho}}\sqrt{\frac{1}{1+ED/E_p t}}$$

حيث:

U = سرعة موجة الضغط على امتداد الأنبوب، ft/s (m/s).

E = معامل مرونة الماء، 43.2×10^6 lb/ft^2 (2.07×10^6 kPa).

ρ = كثافة الماء (الوزن النوعي مقسوماً على تسارع الجاذبية) 1.94 $lb.s/ft^4$.

D = قطر الأنبوب، ft (m).

E_p = معامل مرونة مادة الأنبوب، lb/ft^2 (kg/m^2).

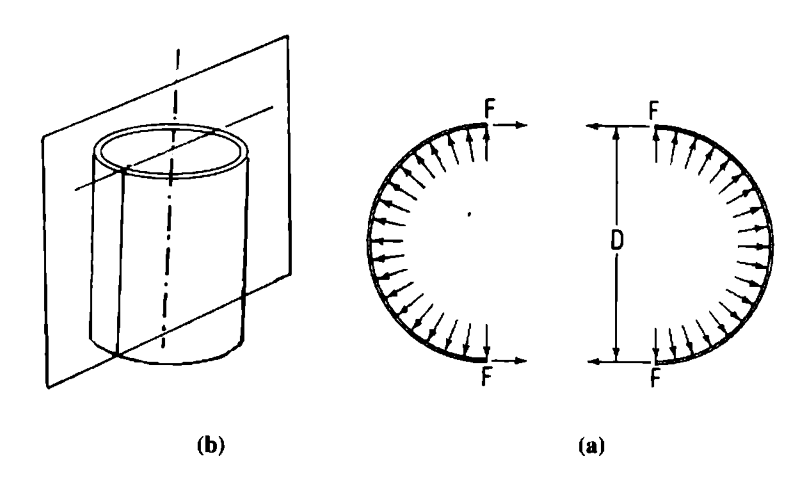
t = ثخانة جدار الأنبوب، ft (m).

إجهادات الأنبوب العمودية على المحور الطولاني

Pipe Stresses Perpendicular To The Longitudinal Axis

الإجهادات الفاعلة عمودياً على محورٍ طولاني لأنبوب سببها إمّا الضغوط الداخلية أو الخارجية على جدران الأنابيب.

يخلق الضغط الداخلي إجهاداً يدعى عموماً بالشد الحلقي. ويمكن حسابه بأخذ مخطط الجسم الطليق لقطعة طولها 1 in (25.4 mm) من أنبوب مقطوع بمستوٍ شاقولي مار من المحور الطولاني (الشكل 12.11).



الشكل 12.11 a) يعطي ضغط الأنبوب الداخلي شداً حلقياً.

b) أنبوب طوله 1 in مقطوع بمستوٍ شاقولي مار من المحور الطولاني

وبعد أن تُستبعَد القوى في الاتجاه الشاقولي، يكون مجموع القوى في الاتجاه الأفقي مساوياً إلى:

$$p\,D = 2\,F$$

حيث:

p = الضغط الداخلي، lb/in^2 (MPa).

D = القطر الخارجي للأنبوب، in (mm).

F = القوة الفاعلة على كل حافة مقطوعة من الأنبوب.

إذن، يكون الإجهاد المطبق على مادة الأنبوب، مقدراً بـــ lb/in^2، مساوياً إلى:

$$f = \frac{F}{A} = \frac{pD}{2t}$$

حيث:

A = مساحة الحافة المقطوعة من الأنبوب، ft^2 (m^2)، ($A = 1\text{ in} \times t = t$).

t = ثخانة جدار الأنبوب، in (mm).

تمدد الأنبوب الناتج عن الفروقات الحرارية

Temperature Expansion Of Pipe

إذا كان الأنبوب خاضعاً لمدىً تتراوح فيه فروقات كبيرة لدرجة الحرارة، فإن الإجهاد الناشئ عن تغير درجة الحرارة، المقدّر بـــ lb/in^2 (MPa)، يُعطى بـــ:

$$f = c\,E\,\Delta T$$

حيث:

E = معامل مرونة مادة الأنبوب، lb/in^2 (MPa).

ΔT = الفارق في درجة الحرارة عن درجة حرارة تركيب الأنبوب.

c = أمثال التمدد الحراري لمادة الأنبوب.

مسافة التحرك التي يجب أن يتم السماح بها، إذا ما كانت فواصل التمدد مستخدمة، هي:

$$\Delta L = L\ c\ \Delta T$$

حيث:

ΔL = مسافة التحرك في طول الأنبوب L.

L = الطول بين فاصلي تمدد.

القوى الناشئة عن إنثناءات الأنابيب Forces Due To Bends

يَكثُر في التطبيقات العملية استخدام مصدّات دفعيّة في إنشاءات الأنابيب لتعبأ بالقوى المؤثرة على الأنبوب الناتجة عن تغير كمية الحركة والضغط الداخلي اللامتوازن للماء.

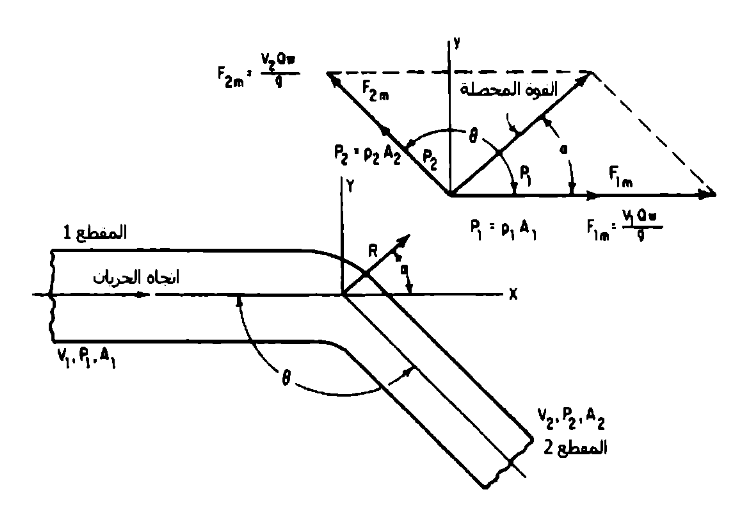
مخطط القوة الموضح في الشكل 12.12 هو الطريقة الملائمة لإيجاد محصلة القوى على الإنثناء. حيث يمكن تحليل القوى إلى المركبتين X وY لإيجاد مقدار واتجاه القوة المحصلة المؤثرة على الأنبوب.

ففي الشكل 12.12:

V_1 = السرعة قبل تغير مقاس الأنبوب، ft/s (m/s).

V_2 = السرعة بعد تغير مقاس الأنبوب، ft/s (m/s).

p_1 = الضغط قبل انثناء أو تغير مقاس الأنبوب، lb/ft^2 (KPa).



الشكل 12.12 القوى الناتجة عن جريان سائل في أنبوب مثني ومتغير القطر.

p_2 = الضغط بعد انثناء أو تغير مقاس الأنبوب، lb/ft^2 (KPa).

A_1 = المساحة قبل تغير مقاس الأنبوب، ft^2 (m^2).

A_2 = المساحة بعد تغير مقاس الأنبوب، ft^2 (m^2).

F_{2m} = القوة الناشئة عن كمية حركة الماء في المقطع (2) وتساوي إلى:

$$F_{2m} = V_2 Q w/g$$

F_{1m} = القوة الناشئة عن كمية حركة الماء في المقطع (1) وتساوي:

$$F_{1m} = V_1 Q w/g$$

P_2 = ضغط الماء في المقطع (2) مضروباً بمساحة المقطع (2) ويساوي:

$$P_2 = p_2 A_2$$

P_1 = ضغط الماء في المقطع (1) مضروباً بمساحة المقطع 1 ويساوي:

$$P_1 = p_1 A_1$$

w = وزن واحدة الحجم للسائل، lb/ft^3 (kg/m^3) (يعني أن w/g هي كثافة السائل).

Q = التدفق، ft^3/s (m^3/s).

إذا كان فاقد الضغط في الإنثناء مهملاً و لم يكن هناك تغير في مقدار السرعة حول الإنثناء، فإن الحل السريع هو:

$$R = 2A\left(w\frac{V^2}{g} + p\right)\text{Cos}\frac{\theta}{2}$$

$$\alpha = \frac{\theta}{2}$$

حيث:

R = القوة المحصلة المؤثرة على الانثناء، lb (N).

α = زاوية R مع F_{lm}.

p = الضغط، lb/ft^2 (kPa).

w = وزن واحدة حجم الماء، $62.4\ lb/ft^3$ ($998.4\ kg/m^3$).

V = سرعة الجريان، ft/s (m/s).

g = تسارع الجاذبية، $32.2\ ft/s^2$ ($9.81\ m/s^2$).

A = مساحة مقطع الأنبوب، ft^2 (m^2).

θ = الزاوية فيما بين خطوط الأنابيب ($0° \le \theta \le 180°$).

مجارير الصرف المستعرضة (التحتية) Culverts

المجرور هو ناقل مائي ذو محيط مغلق يُمرِّر الصرف السطحي إلى ما دون طريق عام أو خط حديدي أو قناة أو أي منشأة مرتفعة تشكل حائلاً لمرور الماء. ويُعيَّنُ ميل المجرور وشكليْ مدخله ومخرجه عادةً بوساطة طبوغرافية الموقع. وبسبب أنه يمكن الحصول على عدة أشكال وهيئات للمجرور حسبما تمليه شروط الدخول والخروج والميل، فليس هناك من صيغة بعينها يمكن أن تُعطى لتطبّق على جميع مسائل المجارير.

إن الطريقة الأساسية لتعيين التدفق من خلال مجرور تتطلب تطبيقاً لمعادلة برنوللي بين نقطتين، الأولى قبل المدخل والثانية في مكان ما من التيار المنحدر.

المدخل والمخرج غائصان

يمتلئ المجرور بالجريان عندما يكون كلٌّ من المخرج والمدخل غائصين، والتدفق في هذه الحالة مستقل عن الميل. وتشكل هذه، حالة جريان أنبوبي عادي ويكون حلها سهلاً بتطبيق صيغةماننيغ أو دارسي فايسباخ الخاصة بالضياع الاحتكاكي. (الشكل 12.13).

المعادلة التالية يتم الحصول عليها من تطبيق معادلة برنوللي على المدخل والمخرج وكذا بتطبيق معادلة ماننيغ للضياع الاحتكاكي:

$$H = (1 - K_e)\frac{V^2}{2g} + \frac{V^2 n^2 L}{2.21 R^{4/3}}$$

وبحل المعادلة بالنسبة لسرعة الجريان ينتج:

$$V = \sqrt{\frac{H}{(1 + K_e / 2g) + (n^2 L / 2.21 R^{4/3})}}$$

حيث:

H = فرق الارتفاع بين المنسوبين المائيين العلوي والسفلي، ft (m).

V = السرعة في المجرور، ft/s (m/s).

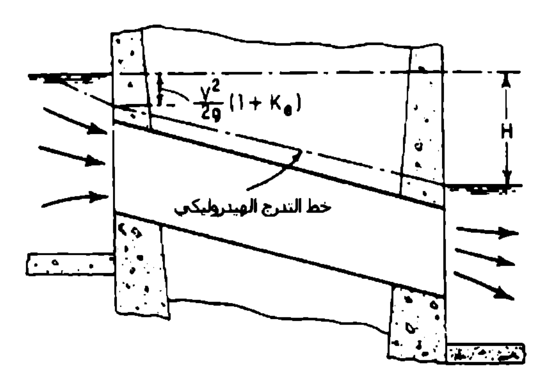
g = تسارع الجاذبية، $32.2\ ft/s^2$ ($9.81\ m/s^2$).

K_e = أمثال ضياع الدخول.

n = أمثال خشونة مانينغ.

L = طول المجرور، ft (m).

R = نصف القطر الهيدروليكي للمجرور، ft (m).



الشكل 12.13 حدوث الجريان الأنبوبي العادي بمدخل ومخرج غائصين. استقلالية التدفق عن الميل. جريان السائل تحت الضغط. يمكن أن يُعيَّن التدفق من معادلتي برنوللي ومانينغ.

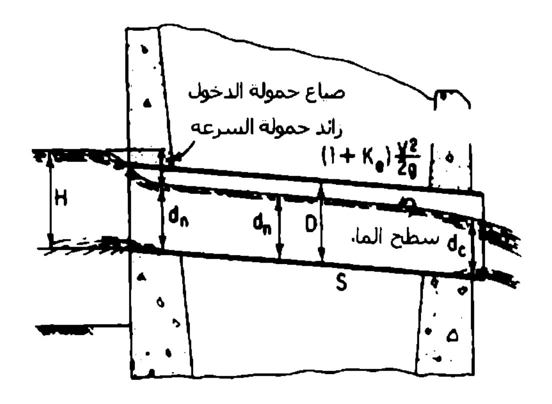
يمكن حل المعادلة السابقة مباشرة لأن السرعة هي المجهول الوحيد.

المجارير على انحدارات لا تصل إلى الحد الحرج

الميل الحرج هو الميل الكافي للحفاظ على الجريان بالعمق الحرج. أمّا عندما يكون الميل أدنى من الميل الحرج، فيعتبر الجريان جرياناً دون الحد الحرج.

مدخل غائص أو غير غائص إلا أن المخرج حر

بما يخص هذه الحالة، وبالاعتماد على الحمولة، يمكن أن يكون الجريان إمّا مضغوطاً أو جريان قناة مكشوفة (الشكل 12.14).



الشكل 12.14 يحدث جريان قناة مكشوفة في مجرور بتدفق حر وعمق نظامي d_n أكبر من العمق الحرج d_c عندما يكون المدخل غير غائص أو غائصاً قليلاً. ويعتمد التدفق على الحمولة H وضياع الدخول وميل المجرور.

يتم الحصول على تدفق شرط القناة المكشوفة بكتابة معادلة برنوللي من أجل نقطتين، الأولى تقع قبل المدخل بقليل والأخرى تقع على مسافة قريبة من المدخل مع التيار المنحدر. وعليه فإن:

$$H = K_e \frac{V^2}{2g} + \frac{V^2}{2g} + d_n$$

يمكن أن تُحسب السرعة من معادلة مانينغ:

$$V^2 = \frac{2.2SR^{4/3}}{n^2}$$

وبتعويضها في العلاقة السابقة:

$$H = (1 + K_e)\frac{2.2}{2gn^2}SR^{4/3} + d_n$$

حيث:

H = الحمولة على المدخل مقاسة من قاع المجرور، ft (m).

K_e = أمثال ضياع الدخول.

S = ميل خط تدرج القدرة، حيث يُفرض في المجارير مساوياً إلى ميل قاع المجرور.

R = نصف القطر الهيدروليكي للمجرور، ft (m).

d_n = العمق النظامي للجريان، ft (m).

لحل معادلة الحمولة السابقة، لابد من المحاولة بعدة قيم لـــ d_n والقيم المقابلة لـــــ R حتى إيجاد تلك القيمة التي تحقق المعادلة.

Open-Channel Flow الجريان في الأقنية المكشوفة

يشمل الجريان السطحي الحر أو الجريان في الأقنية المكشوفة جميع حالات الجريان التي يكون فيها سطح السائل مكشوفاً نحو الغلاف الجوي (الضغط الجوي). وهكذا، يكون الجريانُ في أنبوبٍ جريانَ قناةٍ مكشوفةٍ إذا كان الأنبوب مملوءاً جزئياً.

القناة المنتظمة هي قناة ذات مقطع عرضي ثابت. ويكون لهذه القناة جريان منتظم إذا كان تدرّج أو ميل سطح الماء نفس ما للقناة. وعليه، يكون عمق الجريان ثابتاً خلال الجريان. ويحدث الجريان الدائم في القناة إذا بقي العمق في أي مكان ثابتاً مع الزمن.

يُعرَّف التدفق Q في أي مقطع بحجم الماء المار من ذلك المقطع بواحدة الزمن. فيُعبَّر عنه بالقدم المكعب بالثانية، ft^3/s (متر المكعب بالثانية، m^3/s). ويُعطى بالعلاقة:

$$Q = VA$$

حيث:

V = السرعة الوسطية، ft/s (m/s).

A = مساحة مقطع الجريان، ft^2 (m^2).

عندما يكون التدفق ثابتاً، يقال عن الجريان أنه جريان مستمر، ولذلك يكون:

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 = \ldots$$

حيث يرمز أو يسمي الدليل السفلي مقاطع أقنية مختلفة. تعرف هذه المعادلة بمعادلة الاستمرار للجريان الدائم المستمر.

يقاس عمق الجريان d بالمسافة الشاقولية من قاع القناة إلى سطح الماء، ft (m).

والمحيط المبلول هو طول الخط الذي يُحدِّد مساحة المقطع العرضي للجريان ناقص عرض السطح الحر، ft (m). ويساوي نصف القطر الهيدروليكي R إلى مساحة الجريان مقسومة على محيطها المبلول.

وتُعرَّف السرعة الوسطية للجريان V بأنها التدفق مقسوماً على مساحة الجريان:

$$V = \frac{Q}{A}$$

تعطى حمولة السرعة H_V عموماً بالعلاقة:

$$H_V = \frac{V^2}{2g}$$

V = السرعة الوسطية، ft/s ‏(m/s).

g = تسارع الجاذبية، $32.2\ ft/s^2$ ‏($9.81\ m/s^2$).

ويمكن أن يُعبَّر عن حمولة السرعة الحقيقية بـــ:

$$H_{Va} = \alpha \frac{V^2}{2g}$$

حيث:

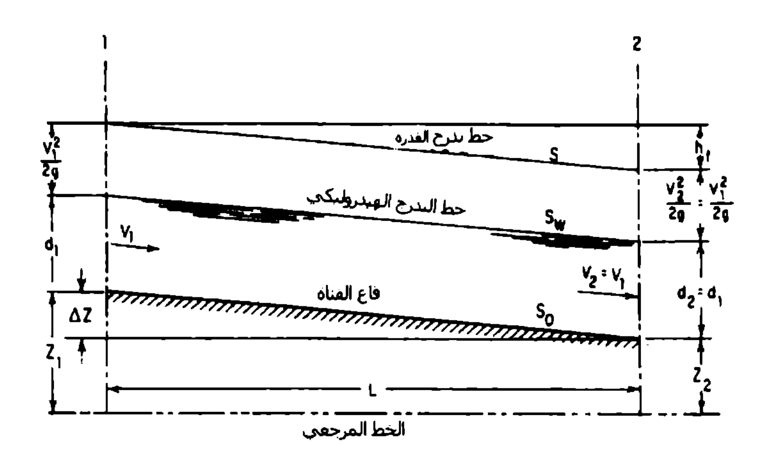
α هو أمثال عملي يُمثّل درجة الاضطراب. وقد أوضَحت البيانات التجريبية أن α يمكن أن تتغير ما بين 1.03 إلى 1.36 تقريباً من أجل الأقنية الموشورية.

مهما يكن، تؤخذ قيمتها في الأحوال العادية مساوية إلى 1.00 بما يخص الأعمال الهيدروليكية، وتحسب قيمتها فقط في حالة التحقيقات الدقيقة عن ضياع القدرة.

تسمى القدرة الإجمالية بالباوند (بالكيلو غرام) من الماء، بالنسبة لقاع القناة في مقطع شاقولي، حمولةَ القدرة المُميّزة (النوعية) H_e. وهي مؤلفة من عمق الجريان عند أي نقطة زائد حمولة السرعة عند النقطة. ويُعبَّر عنها بالقدم (بالمتر) وفق العلاقة:

$$H_e = d + \frac{V^2}{2g}$$

يدعى المقطع الجانبي الطولاني لعلو حمولة القدرة المميزة بخط تدرّج القدرة أو خط الحمولة الإجمالية (الشكل 12.15). ويدعى المقطع الجانبي الطولاني لسطح الماء بخط التدرج الهيدروليكي. وتساوي المسافة الشاقولية بين هذين الخطين عند أي نقطة إلى حمولة السرعة عند تلك النقطة.



الشكل 12.15 الصفات المميزة للجريان المنتظم في قناة مكشوفة.

يساوي ضياع الحمولة الناشئ عن الاحتكاك hf، على امتداد طول معين L في القناة، إلى مقدار الهبوط في الارتفاع للقناة ΔZ على امتداد نفس الطول L. (انظر الشكل 12.15).

عمق الجريان النظامي (الطبيعي)

يدعى عمق الجريان المتوازن، الموجود في قناة الشكل 12.15، بالعمق النظامي (d_n) للجريان. ويكون هذا العمق وحيداً من أجل تدفق معين وشروط معينة للقناة. ويمكن حسابه بطريقة الخطأ والصواب عندما يكون، شكل القناة وميلها وخشونتها وتدفقها، معلومةً. والشكل المقترح لمعادلة مانينغ الخاصة بعملية الحساب هذه هو:

$$AR^{2/3} = \frac{Qn}{1.486S^{1/2}}$$

حيث:

A = مساحة مقطع الجريان، ft^2 (m^2).

R = نصف القطر الهيدروليكي، ft (m).

Q = كمية الجريان أو التدفق، ft^3/s (m^3/s).

n = أمثال خشونة مانينغ.

S = ميل خط تدرج القدرة أو ضياع الحمولة الناشئ عن الاحتكاك بالقدم الطولي (بالمتر الطولي) من القناة ft/linear ft (متر بالمتر الطولي).

ويُشار إلى $AR^{2/3}$ بعامل المقطع.

العمق الحرج للجريان في قناة مكشوفة

يعطي العمق الحرج، من أجل قيمة مفترضة للقدرة المميزة، تدفقاً أعظمياً، أو على نحوٍ معاكس، من أجل قيمة مفترضة للتدفق تكون القدرة المميزة أصغرية عند العمق الحرِج.

يُعطى العمق الحرج (d_c) في الأقنية ذات المقاطع المستطيلة بالعلاقة:

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}}$$

حيث:

d_c = العمق الحرج، ft (m).

Q = كمية الجريان أو التدفق، ft^3/s (m^3/s).

b = عرض القناة، ft (m).

معادلة مانينغ في الأقنية المكشوفة

Manning's Equation For Open Channels

إن المعادلة الأكثر شيوعاً، من بين المعادلات الهائلة الخاصة بتعيين الجريان في قناة مكشوفة، هي معادلة مانينغ المطوّرة من صيغة تشيزي:

$$V = C\sqrt{RS}$$

حيث:

V = السرعة الوسطية للجريان، ft/s ‏(m/s).

R = نصف القطر الهيدروليكي، ft ‏(m).

S = ميل خط تدرج القدرة أو ضياع الحمولة الناشئ عن احتكاك القناة، ويقدر بـ ft/linear ft ‏(m/m).

C = أمثال خشونة تشيزي.

افترض مانينغ أن:

$$C = \frac{1.486^{1/6}}{n}$$

حيث، n أمثال الخشونة في صيغة غانغويلت – كوّتر (Ganguillet-Kutter formula).

وعندما يستخدم عامل مانينغ C في صيغة تشيزي، تنتج معادلة مانينغ الخاصة بسرعة الجريان في قناة مكشوفة:

$$V = \frac{1.486}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

ولأن التدفق، Q = VA، فيمكن إعادة كتابة هذه المعادلة بالشكل:

$$Q = \frac{1.486}{n} AR^{2/3}S^{1/2}$$

حيث:

A = مساحة مقطع الجريان، ft^2 (m^2).

Q = كمية الجريان أو التدفق، ft^3/s (m^3/s).

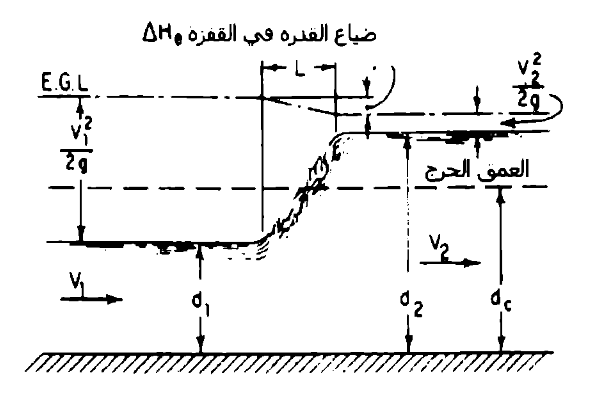
القفزة الهيدروليكية Hydraulic Jump

القفزة الهيدروليكية هي تزايد مفاجئ في عمق ماء يجري بسرعة (الشكل 12.16).

يتحول الجريان عند القفزة من مرحلة الجريان ما فوق الحرج إلى مرحلة الجريان ما دون الحرج مع ضياع مرافق للقدرة الحركية. ولا يكون العمق عند القفزة منقطعاً (فجائياً).

فالتغير في العمق يحدث على امتداد مسافة منتهية تُعرف هذه المسافة بطول القفزة.

سطح التيار الصاعد من القفزة، المعروف بالدوّامة، إن هو إلا كتلة مضطربة من الماء.



الشكل 12.16 القفزة الهيدروليكية.

يساوي العمق قبل القفزة إلى العمق الابتدائي، أما العمق بعد القفزة فهو العمق الناتج، وتكون القدرة المميزة من أجل العمق الناتج أقل من تلك العائدة للعمق الابتدائي بسبب تبدد القدرة بالقفزة. (يفترض أو يجب ألّا يتم الخلط بين العمقين الابتدائي والناتج من جهة مع أعماق خطوط تساوي القدرة أو الأعماق البديلة من جهة أخرى).

قوة الضغط المتنامية في القفزة الهيدروليكية هي:

$$F = \frac{d_2^2 w}{2} - \frac{d_1^2 w}{2}$$

حيث:

d_1 = العمق قبل القفزة، ft (m).

d_2 = العمق بعد القفزة، ft (m).

w = وزن واحدة الحجم للماء، lb/ft^3 (kg/m^3).

ويساوي معدّل تغيّر كمية الحركة عند القفزة بعرض قدم (ft) من القناة إلى:

$$F = \frac{MV_1 - MV_2}{t} = \frac{qw}{g}(V_1 - V_2)$$

حيث:

M = كتلة الماء، $lb.s^2/ft$ ($kg.s^2/m$).

V_1 = السرعة عند العمق d_1، ft/s (m/s).

V_2 = السرعة عند العمق d_2، ft/s (m/s).

q = التدفق بالقدم العرضي من مقطع القناة المستطيل، ft^3/s (m^3/s).

t = واحدة الزمن، s.

g = تسارع الجاذبية، $32.2\ ft/s^2$ ($9.81\ kg/s^2$).

وبالتالي يكون:

$$V_1^2 = \frac{gd_2}{2d_1}(d_2 + d_1)$$

$$d_2 = \frac{-d_1}{2} + \sqrt{\frac{2V_1^2 d_1}{g} + \frac{d_1^2}{4}}$$

$$d_1 = \frac{-d_2}{2} + \sqrt{\frac{2V_2^2 d_2}{g} + \frac{d_2^2}{4}}$$

يساوي ضياع الحمولة في القفزة إلى الفارق في حمولة القدرة قبل وبعد القفزة. هذا الفارق (الشكل 12.17) يُعطى بـــ:

$$\Delta H_e = H_{e1} - H_{e2} = \frac{(d_2 - d_1)^3}{4d_1 d_2}$$

حيث:

H_{e1} = حمولة القدرة المميزة للتيار قبل القفزة، ft (m).

H_{e2} = حمولة القدرة المميزة للتيار بعد القفزة، ft (m).

يمكن أن يُربط العمقان قبل وبعد القفزة الهيدروليكية مع العمق الحرج بالعلاقة:

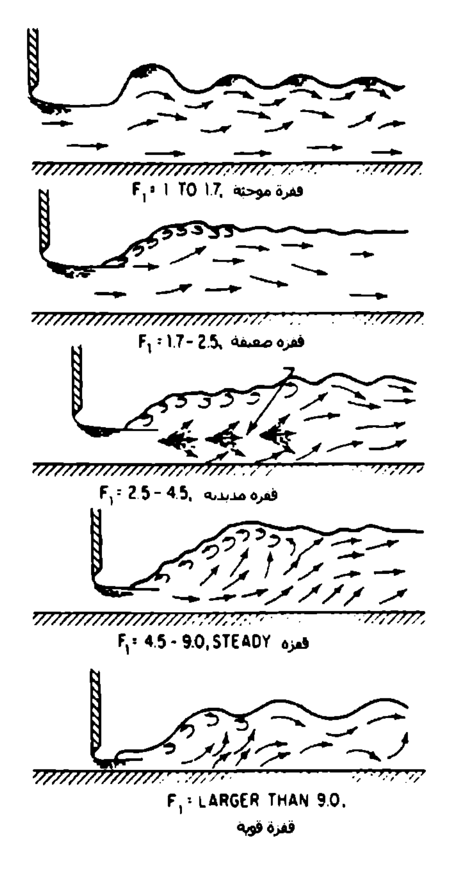
$$d_1 d_2 \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{q^2}{g} = d_c^3$$

حيث:

q = التدفق، ft^3/s (m^3/s)، وذلك بعرض واحد قدم ft (أو واحد متر (m)) من مقطع القناة.

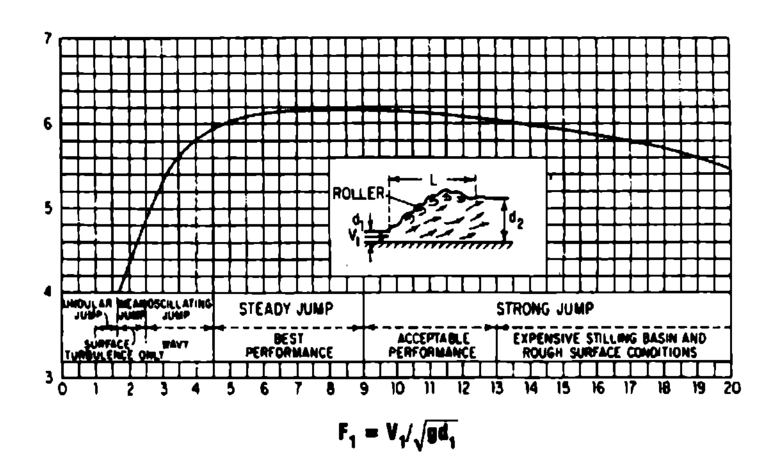
d_c = العمق الحرج للقناة، ft (m).

قد يُلاحظ من هذه المعادلة، أنه إذا كان $d_1 = d_c$، فإن d_2 يجب أن تساوي d_c أيضاً.



الشكل 12.17 يعتمد نوع القفزة الهيدروليكية على عد فرود (Froude number).

يبين الشكل 12.18 كيف يمكن حساب طول القفزة الهيدروليكية باستخدام عدد فرود والنسبة L/d_2.



الشكل 12.18 يعتمد طول القفزة الهيدروليكية في قناة أفقية على العمق الناتج d_2 وعدد فرود وخطوط تقارب الجريان.

الجريان اللامنتظم في الأقنية المكشوفة
Nonuniform Flow In Open Channels

الرموز المستخدمة في هذا المقطع هي:

V = سرعة الجريان في القناة المكشوفة، ft/s (m/s).

D_c = العمق الحرج، ft (m).

g = تسارع الجاذبية، ft/s^2 (m/s^2).

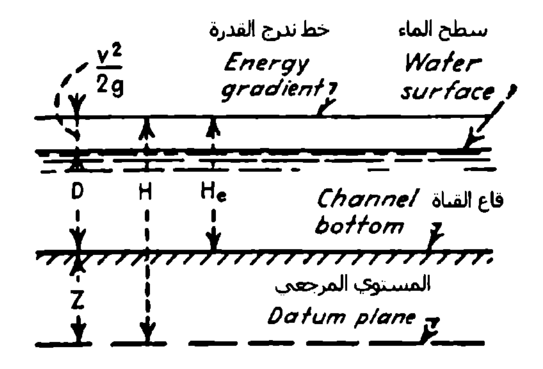
Q = معدّل الجريان أو التدفق، ft^3/s (m^3/s).

q = معدّل الجريان أو التدفق بواحدة العرض، ft^3/ft (m^3/m).

H_m = القدرة المميزة (النوعية) الأصغرية، ft.lb/lb (kg.m/kg).

وأبعاد القناة بالقدم أو بالمتر والرموز الخاصة بهذه الأبعاد معطاة في النص والأشكال التوضيحية.

يحدث الجريان اللامنتظم في الأقنية المكشوفة بتغيرات متدرجة أو مفاجئة في مساحة المقطع العرضي من تيار السائل. ويُستخدم مصطلحا جريان متغيّر تدريجياً وجريان متغير فجائياً لوصف هذين النوعين من الجريان اللامنتظم.



الشكل 12.19 القدرة لجريان سائل في قناة مكشوفة

المعادلات المعطاة لاحقاً هي معادلات للجريان في:

(1) الأقنية ذات المقطع المستطيل.

(2) الأقنية ذات المقطع المثلثي.

(3) الأقنية ذات المقطع المكافئ (قطع مكافئ).

(4) الأقنية ذات المقطع الشبه منحرف.

(5) الأقنية ذات المقطع الدائري.

تغطي هذه الأنواع الخمسة من الأقنية معظم الأمثلة الواقعية التي يتم مواجهتها في الحقل.

يوضح الشكل 12.19 العلاقات العامة للقدرة في جريان سائل في قناة مكشوفة.

الأقنية المستطيلة

يساوي العمق الحرج D_c، في قناة مستطيلة، إلى العمق الوسطي D_m. ويساوي عرض قاع القناة b إلى عرض القمة T. وعندما يؤخذ تدفق السائل كجريان بالقدم (بالمتر) من عرض القناة q، فإن كلاً من T وb يساوي الواحدة. وبالتالي، تكون السرعة الوسطية V_c:

$$V_c = \sqrt{gD_c} \qquad (12.1)$$

و

$$D_c = \frac{V_c^2}{g} \qquad (12.2)$$

أيضاً

$$Q = \sqrt{g}bD_c^{3/2} \qquad (12.3)$$

حيث:

g = تسارع الجاذبية في نظام الواحدات الأميريكية أو الدولية.

$$q = \sqrt{g}D_c^{3/2} \qquad (12.4)$$

و

$$D_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \qquad (12.5)$$

والقدرة المميزة الأصغرية:

$$H_m = \frac{3}{2} D_c \qquad (12.6)$$

والعمق الحرج:

$$D_c = \frac{2}{3} H_m \qquad (12.7)$$

وبالتالي يعطى التدفق بالقدم (بالمتر) من عرض القناة بالعلاقة:

$$q = \sqrt{g}\left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} H_m^{3/2} \qquad (12.8)$$

وبتعويض قيمة، $g = 32.16$، تصبح المعادلة (12.9):

$$q = 3.087 H_m^{3/2} \qquad (12.9)$$

الأقنية المثلثية

يساوي العمق الأعظمي D_c والعمق الوسطي D_m في قناة مثلثية (الشكل 12.20) إلى $\frac{1}{2} D_c$. وبالتالي فإن:

$$V_c = \sqrt{\frac{g D_c}{2}} \qquad (12.10)$$

و

$$D_c = \frac{2 V_c^2}{g} \qquad (12.11)$$

ووفق ما هو موضح في الشكل 12.20، z هي ميل ضلعي القناة، ويعبر عنها بنسبة الأفق على الشاقول. فمن أجل مقاطع متناظرة، $z = e/D_c$. والمساحة هي $a = z D_c^2$.

إذن:

$$Q = \sqrt{\frac{g}{2} z D_c^{5/2}} \quad (12.12)$$

وبتعويض قيمة، $g = 32.16$، تصبح Q:

$$Q = 4.01 z D_c^{5/2} \quad (12.13)$$

و

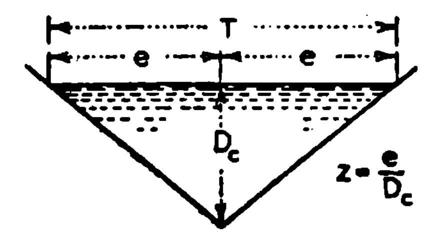
$$D_c = \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{gz^2}} \quad (12.14)$$

أو

$$Q = \sqrt{\frac{g}{2}} \left(\frac{4}{5}\right)^{5/2} z H_m^{5/2} \quad (12.15)$$

وباستبدال قيمة $g = 32.16$، تصبح Q:

$$Q = 2.295 z H_m^{5/2} \quad (12.16)$$



الشكل 12.20 قناة مكشوفة مثلثية.

الأقنية بمقطع عرضي على شكل قطع مكافئ

يمكن أن تُعرَّف هذه الأقنية بصورة ملائمة بوساطة العرض العلوي T والعمق D_c.

وبالتالي تكون المساحة، $a = \frac{2}{3} D_c T$ والعمق الوسطي = D_m.

إذن (انظر الشكل 12.21):

$$V_c = \sqrt{\tfrac{2}{3} g D_c} \quad (12.17)$$

و

$$D_c = \frac{3}{2} \frac{V_c^2}{g} \quad (12.18)$$

إضافة إلى أن:

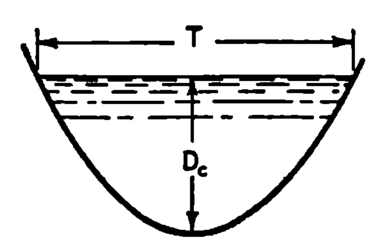
$$Q = \sqrt{\frac{8g}{27}} T D_c^{3/2} \quad (12.19)$$

وباستبدال قيمة، $g = 32.16$:

$$Q = 3.087 T D_c^{3/2} \quad (12.20)$$

و

$$D_c = \frac{3}{2} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g T^2}} \quad (12.21)$$



الشكل 12.21 قناة مكشوفة مقطعها على شكل قطع مكافئ.

وأيضا:

$$Q = \sqrt{\frac{8g}{27}\left(\frac{3}{4}\right)^{3/2}} TH_m^{3/2} \qquad (12.22)$$

وبتعويض قيمة، $g = 32.16$، تصبح Q:

$$Q = 2.005TH_m^{3/2} \quad (12.23)$$

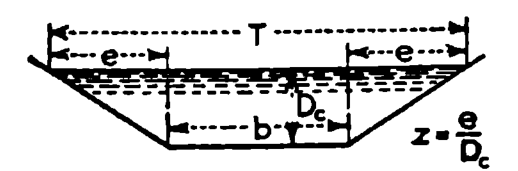
الأقنية الشبه منحرفة

يُظهر الشكل 12.2 قناة شبه منحرفة بعمق D_c وعرض قاع b، وبميل للأضلاع، الأفق مقسوماً على الشاقول، يساوي z. وبالتعبير عن العمق الوسطي D_m باستخدام أبعاد القناة، تكون علاقتا العمق الحرج D_c والسرعة الوسطى V_c:

$$V_c = \sqrt{\frac{b + zD_c}{b + 2zD_c} gD_c} \qquad (12.24)$$

و

$$D_c = \frac{V_c^2}{c} - \frac{b}{2z} + \sqrt{\frac{V_c^4}{g^2} + \frac{b^2}{4z^2}} \qquad (12.25)$$



الشكل 12.22 قناة مكشوفة شبه منحرفة.

ومن ثم يكون التدفق من خلال القناة:

$$Q = \sqrt{g\frac{(b + zD_c)^3}{b + 2zD_c}} D_c^{3/2} \qquad (12.26)$$

وبالتالي، تكون القدرة المميزة الأصغرية والعمق الحرج:

$$H_m = \frac{3b + 5zD_c}{2b + 4zD_c} D_c \qquad (12.27) \quad (12.27)$$

$$D_c = \frac{4zH_m - 3b + \sqrt{16z^2H_m^2 + 16zH_m b + 9b^2}}{10z} \qquad (12.28)$$

الأقنية الدائرية

يوضح الشكل 12.23 قناة دائرية نموذجية، مساحة مقطع السائل فيها a (العرض العلوي للسائل T وعمقه D_c) تساوي إلى:

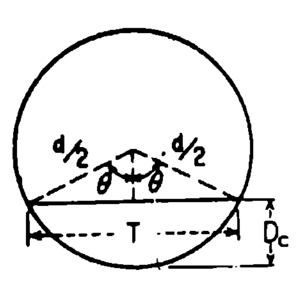
$$a = \frac{d^2}{4}\left(\theta_r - \frac{1}{2}\text{Sin}2\theta\right) \qquad (12.29)$$

$$T = d\ \text{Sin}\theta \qquad (12.30)$$

$$D_c = \frac{d}{2}(1 - \text{Cos}\theta) \qquad (12.31)$$

وبالتالي تُعطى كمية التدفق بـــ:

$$Q = \frac{2^{3/2} g^{1/2}\left(\theta_r - \frac{1}{2}\text{Sin}2\theta\right)^{3/2}}{8(\text{Sin}\theta)^{1/2}(1 - \text{Cos}\theta)^{5/2}} D_c^{5/2} \qquad (12.32)$$



الشكل 12.23 قناة دائرية.

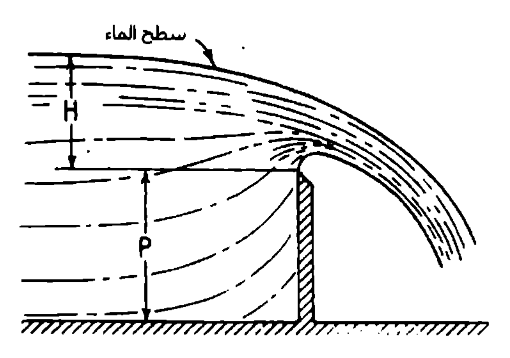
الهدارات (الحواجز المائية) Weirs

الهدار حاجز في قناة مكشوفة يجري فوقه الماء. ويدعى السطح أو الحافة الذي يجري فوقه الماء الذروة أو القمة. وتدعى طبقة الجريان العلوية للماء المارة فوق الهدار بلسان الماء.

فإذا كان اللسان المائي يتدفق في الهواء فإن للهدار تدفقاً حراً. أمّا إذا كان اللسان المائي يتدفق جزئياً تحت الماء، فإن الهدار يكون غائصاً أو مغموراً.

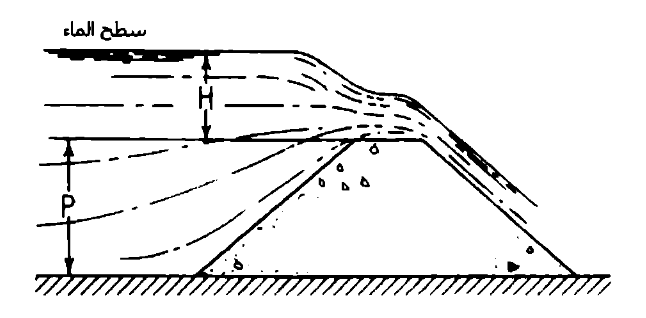
أنواع الهدارات

الهدار ذو الزاوية أو الحافة الحادة المواجهة للتيار، الذي تكون فيه القفزة المائية واضحة تماماً فوق ذروته، يدعى هداراً حاد الذروة (انظر الشكل 12.24). وتصنف الهدّارات الأخرى كهدّارات غير حادة الذروة. وعلى أي حال، تُصنّف الهدارات الحادة الذروة تبعاً لشكل فتحة الهدار، مثل الهدارات المستطيلة والمثلثية والهدارات ذات الثلم V والهدارات الشبه منحرفة وهدارات القطع المكافئ (ذات فتحة على شكل قطع مكافئ).



الشكل 12.24 هدار حاد الذروة

أمّا الهدارات اللاحادة الذروة، فهي مصنفة تبعاً لمقطعها العرضي، مثل الهدارات ذات القمة العريضة والهدارات المثلثية والهدارات الشبه منحرفة (الموضحة في الشكل 12.25).



الشكل 12.25 هدار غير حاد الذروة (حاجز أو سد مائي).

القناة المُمهِّدة للجريان المقترب من الهدار هي قناة التقارب. والسرعة الوسطية في هذه القناة هي سرعة التقارب. وعمق الماء الذي يعطي التدفق الموافق يساوي إلى الحمولة.

تنفع الهدارات الحادة الذروة فقط كوساطة لقياس جريان الماء. بالمقابل، يتم إلحاق الهدارات اللاحادة الذروة، عموماً، بالمنشآت الهيدروليكية كوسائط للتحكم أو لتنظيم الجريان، مع قياس الجريان كعمل ثانوي لها.

الجريان فوق الهدارات — Flow Over Weirs

الهدار المستطيل

صيغة فرانشيس (Francis formula) لتدفق هدار مستطيل حاد الذروة عرضه b أكبر من 3h (h ستعرَّف لاحقاً) هي:

$$Q = 3.33\left(\frac{b-nh}{10}\right)\left[(h+h_o)^{3/2} - h_o^{3/2}\right]$$

حيث:

Q = التدفق فوق الهدار، ft^3/s (m^3/s).

b = طول الهدّار (طول الضلع المستطيل)، ft (m).

h = المسافة الشاقولية من مستوى ذروة الهدار إلى سطح الماء عند نقطة لم تتأثر بعد بهبوط مستوى ماء الهدار (الحمولة على الهدّار)، ft (m).

(انظر الشكلين السابقين، h قريبة من ارتفاع اللسان المنسكب)

n = عدد يتعلق بتضايق النهاية (ويؤخذ 0 أو 1 أو 2).

h_o = حمولة سرعة التقارب [وتساوي إلى $v_0^2/2g_c$ ، حيث v_o هي سرعة التقارب، ft/s (m/s)]، ft (m).

g_c = 32.2، (ليبرة كتلية) (قدم)/(ليبرة قوة) (s^2) أو (m/s^2).

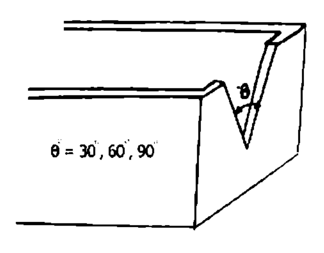
إذا كانت أضلاع الهدار متطابقة مع أضلاع قناة التقارب، فإن الهدار يُعتبر هداراً مُخمَّداً، وتؤخذ n = 0. وإذا كان ضلعا الهدار منـــزاحين إلى حدٍّ كافٍ عن ضلعيْ قناة التقارب للسماح بتقارب جانبي حر لجريان الماء، فإن الهدار يعتبر هدارا متضايقاً، وتؤخذ n = 2. أمّا إذا كان أحد أضلاع الهدار مخمَّداً (مع سوية ضلع القناة) وكان الضلع الآخر متضايقاً (مبتعداً عن ضلع القناة)، فتؤخذ n = 1.



هدار مستطيل بضلع مُخمّد وآخر متضايق   هدار متضايق

الهدار المثلثي

تدفق الهدارات المثلثية ذات الثلم المثلثي بزوايا 30° و60° و90°، معطى بالصيغ الواردة في الجدول 12.2.

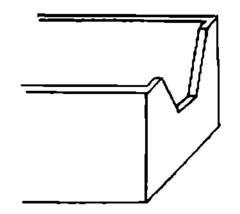


الجدول 12.2 تدفق الهدارات المثلثية.

زاوية الثلم (رأس المثلث)	صيغة التدفق *
90°	$Q = 0.685\ h^{2.45}$
60°	$Q = 1.45\ h^{2.47}$
30°	$Q = 2.49\ h^{2.48}$

* h تمَّ تعريفها في صيغة فرانشيس

الهدار الشبه منحرف (هدار تشبوليتي - Cipolleti weir)



هدار تشيبوليتي، المستخدم كثيراً في أغراض الري، هو هدار شبه منحرف. وينحدر الضلعان، المنفرجان بدءاً من ذروة الهدار، بميل يساوي 1:4 (أفقي/شاقولي).

والتدفق يُعطى بالعلاقة:

$$Q = 3.367\ bh^{3/2}$$

حيث: b و h وQ تمّ تعريفها سابقاً.

ميزة هذا النوع من الهدارات هي أنها لا تحتاج إلى تصحيحات يُطلب حسابها من أجل التضايقات.

الهدار ذو القمة (الذروة) العريضة*

يساوي التدفق في الهدار ذي الذروة العريضة إلى:

$$Q = Cb\, h^{3/2}$$

قيم C العائدة للهدارات ذات الذروة العريضة، بأركان مستديرة مواجهة للتيار، تتحول عموماً من 2.6 إلى 2.4. ومن أجل أركان حادة مواجهة للتيار تتحول C عموماً من 2.4 إلى 2.6. وتُصمم مفيضات السد عادة لتلائم شكل الجانب السفلي من جريان تيار فوق هدار حاد الذروة. ويتغير الأمثال C لمثل هذه المفيضات على نحوٍ ملحوظ مع تغير الحمولة وفق ما هو مبين في الجدول 12.3.

Q و b و h تُعرَّف كما عرّفت من أجل الهدارات المستطيلة.

الجدول 12.3 تغيرات نسبة الحمولة وأمثال التدفق لهدارات ذات ذروة عريضة.

نسبة الحمولة الفعلية إلى الحمولة التصميمية	أمثال التدفق
0.20	3.30
0.40	3.50
0.60	3.70
0.80	3.85
1.00	3.98
1.20	4.10
1.40	4.22

* الهدار ذو القمة العريضة هو نوع من الهدارات اللاحدة الذروة المصنفة تبعاً لمقطعها العرضي. راجع الشكل 12.2. (المعدّ).

توقع معدّل حمل الرسوبيات

Prediction Of Sediment-Delivery Rate

ثمة طريقتان تقريبيتان متاحتان لتوقّع معدّل تراكم الترسّب في حوض تخزين المياه. وكلاهما تستدعيان توقع معدل حمل المادة الرسوبية.

تعتمد الطريقة التقريبية الأولى على تسجيلات زمنية طويلة لمعدّل الطمي المترسب في أحواض التجميع الكائنة. وهي طريقة عملية (حقلية) بحتة.

الطريقة العامة الثانية لحساب معدّل الحمل الرسوبي تستدعي تعيين معدّل نقل الراسب كتابع لتدفق التيار وكثافة السيلت (الطمي) المعلّق.

تُعتبر كمية حمولة السرير تابعاً ثابتاً للتدفق، ذلك لأن كمية المادة الرسوبية التي تزيد من قوى حمولة السرير المائي، تكون دائماً معلومة في معظم الأقنية الخطية. والصيغة المقبولة لحساب كمية المادة الرسوبية المنقولة كحمولة سريرية هي صيغة شوكليتش (Schoklitsch formula):

$$G_b = \frac{86.7}{D_g^{1/2}} S^{3/2} (Q_i - bq_o)$$

حيث:

G_b = حمولة السرير الإجمالية، lb/s (Kg/s).

D_g = القطر الحبي الفعال، in (mm).

S = ميل خط تدرج القدرة.

Q_i = التدفق الآني الإجمالي، ft^3/s (m^3/s).

b = عرض النهر (المجرى)، ft (m).

q_o = التدفق الحرج لعرض النهر (المجرى)، ft^3/s بالقدم (m^3/s بالمتر)، ويساوي:

$$q_o = (0.00532/S^{4/3})\ D_g$$

يمكن القيام بحل تقريبي لصيغة شوكليتش المتعلقة بالحمولة السريرية عن طريق تعيين أو افتراض قيم وسطية للميل والتدفق وحجم الحبة التي تُمثّل المادة الرسوبية في الحمولة السريرية. ويكون عادةً حجم الحبة الوسطي بقطر 0.04 إنش (تقريباً 1 mm) مقبولاً من أجل نهر ذي ميل يساوي 1.0 ft/mi (0.189 m/km) تقريباً.

التبخّر والارتشاح Evaporation And Transpiration

معدلة ماير (Meyer equation)، المُطوَّرة من قانون دالتون (Dalton's law)، هي معادلة من صيغ التبخر العديدة، وهي معادلة شائعة الاستخدام في حسابات معدّل التبخر:

$$E = C\ (e_w - e_a)\ \psi$$

$$\psi = 1 + 0.1\ w$$

حيث:

E = معدّل التبخر في شهر مؤلف من ثلاثين يوماً.

C = أمثال عملي ويساوي إلى 15 من أجل برك صغيرة وضحلة، ويساوي إلى 11 من أجل أحواض كبيرة وعميقة.

e_w = ضغط بخار الإشباع للزئبق، المقابل لدرجة حرارة الهواء الوسطية شهرياً، مقاساً عند محطات قريبة من أجل كتل مائية صغيرة وضحلة، أو ضغط بخار الإشباع للزئبق، المقابل لدرجة حرارة الماء بدلاً من الهواء من أجل كتل مائية كبيرة وعميقة. مقدراً بـــ in (mm).

e_a = ضغط التبخر الفعلي للزئبق، مقدر بـــ in (mm)، في الهواء يعتمد على درجة حرارة الهواء الوسطية شهرياً وعلى الرطوبة النسبية عند محطات قريبة من أجل كتل

صغيرة للماء الضحل. أو يعتمد على المعلومات التي تمّ الحصول عليها فوق 30 قدم (9.14 m) من سطح الماء تقريباً، من أجل كتل كبيرة للماء العميق.

w = سرعة الريح الوسطية شهرياً، فوق 30 ft (9.14 m) من سطح الأرض تقريباً، مقدرة بـــ mi/h (km/h).

ψ = عامل الريح.

وكمثال على التبخر الذي يمكن أن يحدث من بحيرة أو حوض كبير، يساوي التبخر السنوي الوسطي من بحيرة ميد (Mead Lake) إلى 6 ft (1.82 m).

طريقة تعيين التدفق السطحي المطري للمنشآت الهيدروليكية البسيطة

Method For Determining Runoff For Minor Hydraulic Structures

الطريقة الأكثر شيوعاً لتعيين التدفق السطحي المطري في المنشآت الهيدروليكية الثانوية هي الطريقة الأميريكية المتضمنة تطبيق الصيغة المنطقية – rational formula:

$$Q = C\,I\,A$$

حيث:

Q = التدفق الأقصى، ft^3/s (m^3/s).

C = أمثال الجريان السطحي = نسبة مئوية من كمية الأمطار التي تظهر كجريان سطحي مباشر.

I = شدة الهطول المطري، in/h (mm/h).

A = مساحة التصريف، إيكرات ـــ acres (m^2).

حساب شدة الهطول المطري Computing Rainfall Intensity

تتسرد تشو - chow (منظمة غذائية) أربع وعشرين صيغة للشدة المطرية من الشكل:

$$I = \frac{KF^{n1}}{(t+b)^{n}}$$

حيث:

I = شدة الهطول المطري، in/h ‏(mm/h).

K و b و n و n_1 = أمثال وعامل وأُسَّان، على التوالي، وتعتمد على الشروط المؤثرة على شدة الهطول المطري.

F = تردد حدوث الهطول المطري، بالسنوات.

t = فترة العاصفة المطرية، min (بالدقيقة)، وتساوي:

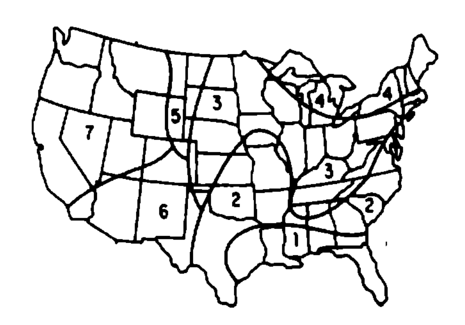
= زمن تركُّز العاصفة.

ربما تكون الصيغة الأكثر جدوى من بين هذه الصيغ هي الصيغة المسماة بصيغة ستيل - Steel formula:

$$I = \frac{K}{t+b}$$

حيث تعتمد K و b على تردد (تكرار) العاصفة وعلى الإقليم من الولايات المتحدة (الشكل 12.26 والجدول 12.4).

تعطي صيغة ستيل معدّلات التساقط (الهطول) العظمى الوسطية لفترات تزيد عن الساعتين.



الشكل 12.26 مناطق (أقاليم) من الولايات المتحدة تستخدم في صيغة ستيل – Steel formula

الجدول 12.4 أمثال خاصة بصيغة ستيل (Coefficients for steel formula)

التردّد، بالسنين	الأمثال	المنطقة 1	2	3	4	5	6	7
2	K	206	140	106	70	70	68	32
	b	30	21	17	13	16	14	11
4	K	247	190	131	97	81	75	48
	b	29	25	19	16	13	12	12
10	K	300	230	170	111	111	122	60
	b	36	29	23	16	17	23	13
25	K	327	260	230	170	130	155	67
	b	33	32	30	27	17	26	10

المياه الجوفيّة Groundwater

المياه الجوفية هي المياه التحت سطحية في الطبقات المسامية الواقعة ضمن منطقة التشبع بالماء. وتزوّد المياه الجوفية 20 % تقريباً من احتياجات المياه في الولايات المتحدة.

الجيوب الجوفية هي تشكّلات مياه جوفية قادرة على تزويد المياه بشكل اقتصادي.

أما بالنسبة لتلك التشكلات التي لا تستطيع الإمدادات منها أن تكون اقتصادية فتدعى جيوباً ناضبةً.

توضّح النفاذية السهولة التي يتسرب بها الماء من خلال التربة وتُعيّن إذا كان التشكّل الجوفي للماء هو جيب معطاء أم ناضب (اقتصادي أم غير اقتصادي).

يُعطى معدّل تحرّك (تسرّب) الماء الجوفي بقانون دارسي Darcy's law:

$$Q = KIA$$

حيث:

Q = معدّل الجريان، gal/day (m^3/day).

K = الناقلّية الهيدروليكية، ft/day (m/day).

I = التدرج الهيدروليكي، ft/ft (m/m).

A = مساحة المقطع العرضي العمودي على اتجاه الجريان، ft^2 (m^2).

حساب معدّل تدفق الماء المطلوب لإخماد النيران

Water Flow For Firefighting

الكمية الإجمالية من المياه المستخدمة لمكافحة النيران كمية قليلة في الأحوال العادية، إلا أن معدّل التدفق المطلوب يكون مرتفعاً. والعلاقة الخاصة بحساب معدّل التدفق المطلوب للحريق رُسِّخت من قبل جمعية التأمين الأميريكية وفق:

$$Q = 1020\sqrt{P}(1 - 0.01\sqrt{P})$$

حيث:

G = المعّدل المطلوب للحريق، gal/min ‏(liter/s).

P = تعداد السكان، بالآلاف.

Flow From Wells الجريان من الآبار

يمكن إيجاد معدّل الجريان الدائم Q من بئر ثقالي باستخدام صيغة دوبوي - Dupuit formula:

$$Q = \frac{1.36K(H^2 - h^2)}{\log(D/d)}$$

حيث:

Q = التدفق، gal/day ‏(liter/day).

K = الناقلية الهيدروليكية، ft/day ‏(m/day)، وذلك تحت تأثير تدرج هيدروليكي مقداره 1:1.

H = العمق الإجمالي للماء بدءاً من قاع البئر إلى سطح الماء الحر قبل الضخ، ft ‏(m).

h = H ناقص هبوط السحب (هبوط المنسوب)، ft ‏(m).

D = قطر دائرة التأثير، ft ‏(m).

d = قطر البئر، ft ‏(m).

ويعطى الجريان الدائم من بئر إرتوازي (artesian well)، مقدراً بـ (liter/day) gal/day، بالعلاقة:

$$Q = \frac{2.73Kt(H - h)}{\log(D/d)}$$

حيث، t ثخانة الجيب المحصور، ft ‏(m).

حساب المقاسات الاقتصادية لأنابيب شبكة التوزيع

Economical Sizing Of Distribution Piping

المعادلة الخاصة بحساب القطر الأكثر اقتصادية لأنبوب في منظومة شبكة توزيع المياه هي:

$$D = 0.215\left(\frac{fbQ_a^3S}{aiH_a}\right)^{1/7}$$

حيث:

D = قطر الأنبوب، ft (m).

f = عامل احتكاك دارسي - فايسباخ.

b = سعر الطاقة، $/hp بالسنة ($/kw بالسنة).

Q_a = التدفق الوسطي، ft^3/s (m^3/s).

S = إجهاد الواحدة المسموح في الأنبوب، lb/in^2 (MPa).

a = كلفة الإنتاج المحلي للأنبوب، $/lb ($/kg).

i = التكاليف السنوية الثابتة (رسوم تُدفع بانتظام سنوياً) لخط الأنابيب (مُعبَّر عنها بكسر من قيمة رأس المال الإجمالي)

H_a = الحمولة الوسطية على الأنبوب، ft (m).

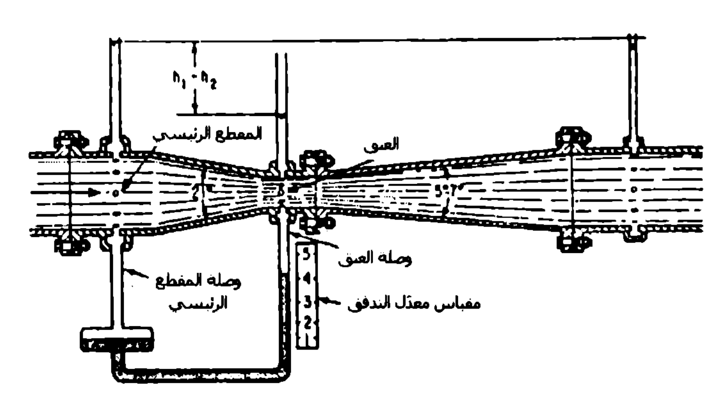
* مما لاشك فيه أن هذه العلاقة مُعتمَدة في نظام رأسمالي يتقدم بعرض المناقصة شركات خاصة تستثمر المشروع لمدة زمنية مسماة. (المعدّ).

حساب تدفق أنبوب الفنتوري القائس

Venturi Meter Flow Computation

يُعطى التدفق من خلال الفنتوري القائس (الشكل 12.27) بالعلاقة:

$$Q = cKd_2^2\sqrt{h_1 - h_2}$$



الشكل 12.27. فنتوري قائس نظامي (قياسي)

و :

$$K = \frac{4}{\pi}\sqrt{\frac{2g}{1-(d_2/d_1)^2}}$$

حيث:

Q = معدّل التدفق، ft^3/s (m^3/s).

c = أمثال تدفق عملي يعتمد على سرعة الجريان في العنق، وعلى القطر أيضاً.

d_1 = قطر المقطع الرئيسي، ft (m).

d_2 = قطر العنق، ft (m).

h_1 = ضغط الماء في المقطع الرئيسي (الضغط الهيدروستاتيكي)، ft (m).

h_2 = ضغط الماء في مقطع العنق (الضغط الهيدروستاتيكي)، ft (m).

توليد الطاقة الكهرمائية (الهيدروإلكترية)
Hydroelectric Power Generation

الطاقة الهيدروإلكترّية هي طاقة كهربائية يتم الحصول عليها من تحويل القدرة الكامنة والحركية للماء. فالقدرة الكامنة لحجم من الماء هي جداء وزنها والمسافة الشاقولية التي تهبطها:

$$PE = WZ$$

حيث:

PE = القدرة الكامنة.

W = الوزن الإجمالي للماء.

Z = المسافة الشاقولية التي يهبطها الماء.

الطاقة (الاستطاعة) هي المعدّل الذي به تُنتَج أو تستخدم القدرة:

1 حصان استطاعة (hp) = 550 ft.lb/s

1 كيلو واط (kW) = 738 ft.lb/s

$$1\ hp = 0.746\ kw$$

$$1\ kW = 1.341\ hp$$

والطاقة التي يتم الحصول عليها من جريان الماء يمكن أن تُحسَب من:

$$hp = \frac{\eta Qwh}{550} = \frac{\eta Qh}{8.8}$$

$$kW = \frac{\eta Qwh}{738} = \frac{\eta Qh}{11.8}$$

حيث:

kW = كيلو واط.

hp = حصان استطاعة.

Q = معدّل التدفق، ft^3/s (m^3/s).

w = وزن واحدة الحجم للماء = $62.4\ lb/ft^3$ ($998.4\ kg/m^3$).

h = الحمولة الفعّالة = فرق الارتفاع الإجمالي ناقص الضياعات الخطية الناشئة عن الاحتكاك والاضطراب، ft (m).

η = مردود العنفة (التروبين) والمولّد.

A

جداول مفيدة

Useful Tables

المعادلات الأساسية في علم ميكانيك المواد

الحمولة المحورية Axial load

الإجهاد الناظمي $\sigma = \frac{\rho}{A}$

الإزاحة $\delta = \int_{o}^{L} \frac{P(x)d_x}{A(x)E}$

$$\delta = \sum \frac{PL}{AE}$$

$$\delta L = \alpha \Delta T L$$

الفتل Torsion

إجهاد القص في جذع أسطواني دائري $\tau = \frac{T\rho}{J}$

حيث: $J = \frac{\pi}{2} C^4$ لمقطع عرضي مليء

$J = \frac{\pi}{2}(C_o^4 - C_i^4)$ لمقطع عرضي أنبوبي

الطاقة $\rho = T\,\omega = 2\,\pi\,f\,T$

زاوية الفتل:

$$\phi = \int_{o}^{L} \frac{T(x)d_x}{J(x)G}$$

$$\phi = \sum \frac{TL}{JG}$$

إجهاد القص الوسطي في أنبوب رقيق الجدار $\tau_{avg} = \frac{T}{2 + A_m}$

قص السيلان $q = \tau_{avg}\, t = \frac{T}{2 + A_m}$

الانعطاف Bending

الإجهاد الناظمي $\sigma = \frac{My}{I}$

الانعطاف اللا تناظري $\sigma = -\frac{M_z y}{I_z} + \frac{M_y z}{I_y}$ ، $\tan\alpha = \frac{I_z}{I_y}\tan\theta$

القص Shear

إجهاد القص المباشر الوسطي $\tau_{avg} = \frac{V}{A}$

إجهاد القص المستعرض $\tau = \frac{VQ}{It}$

قص السيلان $q = \tau t = \frac{VQ}{I}$

الإجهاد في إناء مضغوط رقيق الجدار
Stress in Thin-Walled Pressure Vessel

أسطوانة $\sigma_1 = \frac{pr}{t}$ $\sigma_2 = \frac{pr}{2t}$

كرة $\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pr}{2t}$

معادلات تحويل القص Stress Transformation Equations

$$\sigma'_x = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\mathrm{Cos}2\theta + \tau_{xy}\mathrm{Sin}2\theta$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\mathrm{Sin}2\theta + \tau_{xy}\mathrm{Cos}2\theta$$

الإجهاد الأولي

$$\tan 2\theta_p = \frac{\tau_{xy}}{(\sigma_x - \sigma_y)/2}$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}{}^2}$$

إجهاد القص الأعظمي في مستوٍ

$$\tan 2\theta_s = -\frac{(\sigma_x - \sigma_y)/2}{\tau_{xy}}$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{avg} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$$

إجهاد القص الأعظمي المطلق

$$\tau_{\substack{abs \\ max}} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_{avg} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

الخصائص الفيزيائية

	الكثافة kg/m³	الوزن النوعي lb/ft³		الكثافة kg/m³	الوزن النوعي lb/ft³
Air*	1.2062	0.07530			
Aluminum	2 690	168	Iron (cast)	7 210	450
Concrete (av.)	2 400	150	Lead	11 370	710
Copper	8 910	556	Mercury	13 570	847
Earth (wet, av.)	1 760	110	Oil (av.)	900	56
(dry, av.)	1280	80	Steel	7830	489
Glass	2 590	162	Titanium	3 080	192
Gold	19 300	1205	Water (fresh)	1 000	62.4
Ice	900	56	(salt)	1 030	64
*At 20 °C (68 °F) and atmospheric			Wood (soft pine)	480	30
pressure			(hard oak)	800	50

* عند درجة الحرارة (68 °F) 20 C° والضغط الجوي النظامي

أمثال الاحتكاك

(تُمثّل أمثال الاحتكاك في الجدول اللاحق قيماً نموذجية تحت شروط العمل النظامية. وسيعتمد الأمثال الفعلي، من أجل حالة مفروضة، على طبيعة سطوح التماس الدقيقة. لذا فإن انحرافاً بمقدار 25% إلى 100% أو حتى أكثر من ذلك يمكن توقعه في التطبيق العملي، وذلك بالنظر إلى الظروف السائدة على السطوح مثل نظافة السطح ونعومته والضغط عليه والسرعة، ...)

سطح التماس	قيم أمثال الاحتكاك النموذجية	
	سكونية μS	حركية μk
Steel on steel (dry)	0.6	0.4
Steel on steel (greasy)	0.1	0.05
Teflon on steel	0.04	0.04
Steel on babbitt (dry)	0.4	0.3
Steel on babbitt (greasy)	0.1	0.07
Brass on steel (dry)	0.5	0.4
Brake lining on cast iron	0.4	0.3
Rubber tires on smooth pavement (dry)	0.9	0.8
Wire rope on iron pulley (dry)	0.2	0.15
Hemp rope on metal	0.3	0.2
Metal on ice		0.02

ثوابت النظام الشمسي

ثابت التجاذبية الكوني	$G = 6.673\ (10^{-11})\ m^3/(kg.s^2)$
	$= 3.439\ (10^{-8})\ ft^4/(lbf\text{-}s^4)$
كتلة الأرض	$m_e = 5.976\ (10^{24})$ kg
	$= 4.095\ (10^{23})\ lbf\text{-}s^2/ft$
فترة دوران الأرض (يوم نجمي واحد)	= 23 h 56 min 4 s
	= 23.9344 h
السرعة الزاوية للأرض	$\omega = 0.7292\ (10^{-4})$ rad/s
السرعة الزاوية الوسطية للخط الواصل الأرض بالشمس	$\omega' = 0.1991\ (10^{-6})$ rad/s
السرعة الوسطية لمركز الأرض حول الشمس	= 107 200 km/h
	= 66.610 mi/h

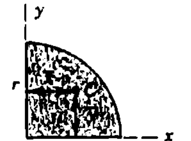
الجسم	البعد الوسطي عن الشمس	لا مركزية المدار	فترة المدار	القطر الوسطي	الكتلة منسوبة للأرض	التسارع التجاذبي السطحي	سرعة الانفلات (الهروب)
Sun	-	-	-	1 392 000	333 000	274	616
				(865 000)		(898)	(383)
Moon	384 398*	0.055	27.32	3 476	0.0123	1.62	2.37
	(238 854)*			(2 160)		(5.32)	(1.47)
Mercury	57.3×10^6	0.206	87.97	5 000	0.054	3.47	4.17
	(35.6×10^6)			(3 100)		(11.4)	(2.59)
Venus	108×10^6	0.0068	224.70	12 400	0.815	8.44	10.24
	(67.2×10^6)			(7 700)		(27.7)	(6.36)
Earth	149.6×10^6	0.0167	365.26	12 742**	1.000	9.821***	11.18
	(92.96×10^6)			(7 918)**		(32.22) ***	(6.95)
Mars	227.9×10^6	0.093	686.98	6 788	0.107	3.73	5.03
	(141.6×10^6)			(4 218)		(12.3)	(3.13)

* البعد الوسطي عن الأرض (من المركز إلى المركز)

** قطر كرة من حجم متساو، يعتمد على مجسم الأرض ذي القطر القطبي 12 714km والقطر الاستوائي 12 756km

*** من أجل الأرض الكروية اللا دوّارة، تساوي إلى القيمة المطلقة عند سطح البحر وخط العرض 37.5°

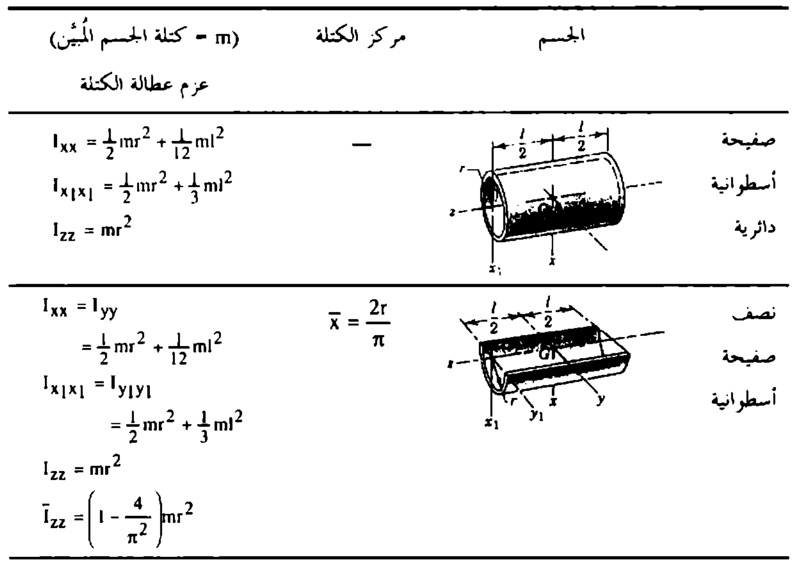
الخصائص الهندسية للأشكال المستوية

	الشكل	مركز الثقل	عزم عطالة المساحة
قطعة قوسية		$\bar{r} = \frac{r \sin a}{a}$	—
قوسا ربع ونصف دائرة		$\bar{y} = \frac{2r}{\pi}$	—
مساحة دائرية		—	$I_x = I_y = \frac{\pi r^4}{4}$ $I_z = \frac{\pi r^4}{2}$
مساحة نصف دائرية		$\bar{y} = \frac{4r}{3\pi}$	$I_x = I_y = \frac{\pi r^4}{8}$ $\bar{I}x = \left(\frac{\pi}{8} - \frac{8}{9\pi}\right) r^4$ $I_z = \frac{\pi r^4}{2}$
مساحة ربع دائرية		$\bar{x} = \bar{y} = \frac{4r}{3\pi}$	$I_x = I_y = \frac{\pi r^4}{16}$ $\bar{I}_z = \bar{I}_y = \left(\frac{\pi}{16} - \frac{4}{9\pi}\right) r^4$ $I_z = \frac{\pi r^4}{8}$

	الشكل	مركز الثقل	عزم عطالة المساحة
مساحة قطاع دائري		$\bar{x} = \frac{2}{3}\frac{r\sin\alpha}{\alpha}$	$I_x = \frac{r^4}{4}(\alpha - \frac{1}{2}\sin 2\alpha)$ $I_y = \frac{r^4}{4}(\alpha + \frac{1}{2}\sin 2\alpha)$ $I_z = \frac{1}{2}r^4\alpha$
مساحة مستطيلة		—	$I_x = \frac{bh^3}{3}$ $\bar{I}_x = \frac{bh^3}{12}$ $\bar{I}_z = \frac{bh}{12}(b^2 + h^2)$
مساحة مثلثية		$\bar{x} = \frac{a+b}{3}$ $\bar{y} = \frac{h}{3}$	$I_x = \frac{bh^3}{3}$ $\bar{I}_x = \frac{bh^3}{36}$ $\bar{I}x1 = \frac{bh^3}{4}$
مساحة ربع قطع ناقص		$\bar{x} = \frac{4a}{3\pi}$ $\bar{y} = \frac{4b}{3\pi}$	$I_x = \frac{\pi\alpha b^3}{16}$, $\bar{I}_x = \left(\frac{\pi}{16} - \frac{4}{9\pi}\right)\alpha b^3$ $I_y = \frac{\pi\alpha^3 b}{16}$, $\bar{I}_y = \left(\frac{\pi}{16} - \frac{4}{9\pi}\right)\alpha^3 b$ $I_z = \frac{\pi\alpha b}{16}(\alpha^2 + b^2)$
مساحة جزء من قطع مكافئ		$\bar{X} = \frac{3a}{4}$ $\bar{y} = \frac{3b}{10}$	$I_x = \frac{\alpha b^3}{21}$ $I_y = \frac{\alpha^3 b}{5}$ $I_z = \alpha b\left(\frac{\alpha^2}{5} + \frac{b^2}{21}\right)$

	الشكل	مركز الثقل	عزم عطالة المساحة
مساحة قطع مكافئ	$y = kx^2 = \frac{b}{a^2}x^2$	$\bar{x} = \frac{3a}{8}$ $\bar{y} = \frac{3b}{5}$	$I_x = \frac{2ab^3}{7}$ $I_y = \frac{2a^3b}{15}$ $I_z = 2ab\left(\frac{\alpha^2}{15} + \frac{b^2}{7}\right)$

الخصائص الهندسية للمجسمات المتجانسة



	الجسم	مركز الكتلة	(m = كتلة الجسم المُبيَّن) عزم عطالة الكتلة
صفيحة أسطوانية دائرية		—	$I_{xx} = \frac{1}{2}mr^2 + \frac{1}{12}ml^2$ $I_{x_1x_1} = \frac{1}{2}mr^2 + \frac{1}{3}ml^2$ $I_{zz} = mr^2$
نصف صفيحة أسطوانية		$\bar{x} = \frac{2r}{\pi}$	$I_{xx} = I_{yy} = \frac{1}{2}mr^2 + \frac{1}{12}ml^2$ $I_{x_1x_1} = I_{y_1y_1} = \frac{1}{2}mr^2 + \frac{1}{3}ml^2$ $I_{zz} = mr^2$ $\bar{I}_{zz} = \left(1 - \frac{4}{\pi^2}\right)mr^2$

الجسم		مركز الكتلة	عزم عطالة الكتلة (m = كتلة الجسم المُبيَّن)
أسطوانة دائرية		—	$I_{xx} = \frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{12}ml^2$ $I_{x_1x_1} = \frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{3}ml^2$ $I_{zz} = \frac{1}{2}mr^2$
نصف أسطوانة		$\bar{x} = \frac{4r}{3\pi}$	$I_{xx} = I_{yy}$ $= \frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{12}ml^2$ $I_{x_1x_1} = I_{y_1y_1}$ $= \frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{3}ml^2$ $I_{zz} = \frac{1}{2}mr^2$ $\bar{I}_{zz} = \left(\frac{1}{2} - \frac{16}{9\pi^2}\right)mr^2$
متوازي مستطيلات قائم الزوايا		—	$I_{xx} = \frac{1}{12}m(a^2 + l^2)$ $I_{yy} = \frac{1}{12}m(b^2 + l^2)$ $I_{zz} = \frac{1}{12}m(a^2 + b^2)$ $I_{y_1y_1} = \frac{1}{12}mb^2 + \frac{1}{3}ml^2$ $I_{y_2y_2} = \frac{1}{3}m(b^2 + l^2)$
قشرة أو صفيحة كروية		—	$I_{zz} = \frac{2}{3}mr^2$
صفيحة نصف كروية		$\bar{x} = \frac{r}{2}$	$I_{xx} = I_{yy} = I_{zz} = \frac{2}{3}mr^2$ $\bar{I}_{yy} = \bar{I}_{zz} = \frac{5}{12}mr^2$

	الجسم	مركز الكتلة	عزم عطالة الكتلة (m = كتلة الجسم المبيَّن)
كرة		—	$I_{zz} = \frac{2}{5} mr^2$
نصف كرة		$\bar{x} = \frac{3r}{8}$	$I_{xx} = I_{yy} = I_{zz} = \frac{2}{5} mr^2$ $\bar{I}_{yy} = \bar{I}_{zz} = \frac{83}{320} mr^2$
قضيب نحيف منتظم		—	$I_{yy} = \frac{1}{12} ml^2$ $I_{y_1y_1} = \frac{1}{3} ml^2$
قضيب ربع دائري		$\bar{x} = \bar{y} = \frac{2r}{\pi}$	$I_{xx} = I_{yy} = \frac{1}{2} mr^2$ $I_{zz} = mr^2$
أسطوانة ذات مقطع عرضي على شكل قطع ناقص		—	$I_{xx} = \frac{1}{4} ma^2 + \frac{1}{2} ml^2$ $I_{yy} = \frac{1}{4} mb^2 + \frac{1}{12} ml^2$ $I_{zz} = \frac{1}{4} m(a^2 + b^2)$ $I_{y_1y_1} = \frac{1}{4} mb^2 + \frac{1}{3} ml^2$

الجسم	مركز الكتلة	عزم عطالة الكتلة (m - كتلة الجسم المبيَّن)
صفيحة مخروطية	$\bar{z} = \frac{2h}{3}$	$I_{yy} = \frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{2}mh^2$ $I_{y_1y_1} = \frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{6}mh^2$ $I_{zz} = \frac{1}{2}mr^2$ $\bar{I}_{yy} = \frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{18}mh^2$
صفيحة نصف مخروطية	$\bar{x} = \frac{4r}{3\pi}$ $\bar{z} = \frac{2h}{3}$	$I_{xx} = I_{yy}$ $= \frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{2}mh^2$ $I_{x_1x_1} = I_{y_1y_1}$ $= \frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{6}mh^2$ $I_{zz} = \frac{1}{2}mr^2$ $\bar{I}_{zz} = \left(\frac{1}{2} - \frac{16}{9\pi^2}\right)mr^2$
مخروط دائري قائم	$\bar{z} = \frac{3h}{4}$	$I_{yy} = \frac{3}{20}mr^2 + \frac{3}{5}mh^2$ $I_{y_1y_1} = \frac{3}{20}mr^2 + \frac{1}{10}mh^2$ $I_{zz} = \frac{3}{20}mr^2$ $\bar{I}_{yy} = \frac{3}{20}mr^2 + \frac{3}{80}mh^2$
نصف مخروط	$\bar{x} = \frac{r}{\pi}$ $\bar{z} = \frac{3h}{4}$	$I_{xx} = I_{yy}$ $= \frac{3}{20}mr^2 + \frac{3}{5}mh^2$ $I_{x_1x_1} = I_{y_1y_1}$ $= \frac{3}{20}mr^2 + \frac{1}{10}mh^2$ $I_{zz} = \frac{3}{10}mr^2$ $\bar{I}_{zz} = \left(\frac{3}{10} - \frac{1}{\pi^2}\right)mr^2$

عزم عطالة الكتلة (m = كتلة الجسم المُبيَّن)	مركز الكتلة	الجسم
$I_{xx} = \frac{1}{5}m(b^2 + c^2)$ $I_{yy} = \frac{1}{5}m(a^2 + c^2)$ $I_{zz} = \frac{1}{5}m(a^2 + b^2)$ $\bar{I}_{xx} = \frac{1}{5}m(b^2 + \frac{19}{64}c^2)$ $\bar{I}_{yy} = \frac{1}{5}m(a^2 + \frac{19}{64}c^2)$	$\bar{z} = \frac{3c}{8}$	نصف مجسم قطع ناقص
$I_{xx} = \frac{1}{6}mb^2 + \frac{1}{2}mc^2$ $I_{yy} = \frac{1}{6}ma^2 + \frac{1}{2}mc^2$ $I_{zz} = \frac{1}{6}m(a^2 + b^2)$ $\bar{I}_{xx} = \frac{3}{6}m(b^2 + \frac{1}{3}c^2)$ $\bar{I}_{yy} = \frac{1}{6}m(\alpha^2 + \frac{1}{3}c^2)$	$\bar{z} = \frac{2c}{3}$	مجسم قطع مكافئ ناقصي
$I_{xx} = \frac{1}{10}m(b^2 + c^2)$ $I_{yy} = \frac{1}{10}m(a^2 + c^2)$ $I_{zz} = \frac{1}{10}m(a^2 + b^2)$ $\bar{I}_{xx} = \frac{3}{80}m(b^2 + c^2)$ $\bar{I}_{yy} = \frac{3}{80}m(a^2 + c^2)$ $\bar{I}_{zz} = \frac{3}{80}m(a^2 + b^2)$	$\bar{x} = \frac{a}{4}$ $\bar{y} = \frac{b}{4}$ $\bar{z} = \frac{c}{4}$	رباعي وجوه قائم
$I_{xx} = I_{yy} = \frac{1}{2}mR^2 + \frac{5}{8}ma^2$ $I_{zz} = mR^2 + \frac{3}{4}ma^2$	$\bar{x} = \frac{a^2 + 4R^2}{2\pi R}$	نصف حلقة*

* Torus (الحلقة): ناتجة عن دوران دائرة حول محور مثل المحور Z أو أي محور آخر موازي له.؟

B

مواضيع منتقاة
من العلوم الرياضية

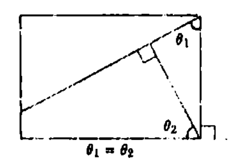
Selected Topics
of Mathematics

Introduction مدخل

يتضمن الملحق B ملخصاً مقتضباً وتذكرة بأهم المواضيع المنتقاة من الرياضيات الأساسية والتي تلقى استخداماً متكرراً في علوم ميكانيك الإنشاءات. وسيجد الطلاب أنفسهم في كثير من الأحيان ملزمين باستخدام هذه العلاقات، في حين أنهم سيقفون مكتوفي الأيدي إن لم تكن هذه العلاقات بين أيديهم.

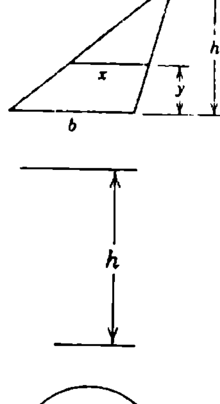
Plane Geometry الهندسة المستوية

1. عندما يتعامد خطان متقاطعان على خطين آخرين على نحوٍ متتالي، فإن الزاويتين المشكلتين بكل زوج من الخطوط متساويتان.



2. المثلثات المتشابهة

$$\frac{x}{b} = \frac{h - y}{h}$$



3. أي مثلث

$$\text{المساحة} = \frac{1}{2} bh$$

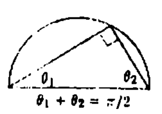
4. الدائرة

$$\text{المحيط} = 2 \pi r$$

$$\text{المساحة} = \pi r^2$$

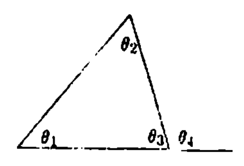
$r\theta$ = طول القوس

$\frac{1}{2}r^2\theta$ = مساحة قطاع



5. أي مثلث مُحاط بنصف دائرة هو مثلث قائم

$$\theta_1 + \theta_2 = \pi/2$$



6. زوايا المثلث

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 180°$$

$$\theta_4 = \theta_1 + \theta_2$$

الهندسة الفراغية — Solid Geometry

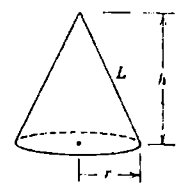
1. الكرة

$\frac{4}{3}\pi r^3$ = الحجم

$4\pi r^2$ = مساحة السطح

2. الحز الكروي

$\frac{2}{3}r^3\theta$ = الحجم

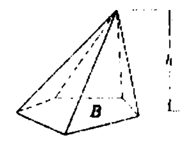


3. المخروط الدائري القائم

الحجم = $\frac{1}{3}\pi r^2 h$

المساحة الجانبية = $\pi r L$

$L = \sqrt{r^2 + h^2}$



4. أي هرم أو مخروط

الحجم = $\frac{1}{3}Bh$

حيث: B = مساحة القاعدة

ALGEBRA الجبر

1. المعادلة التربيعية

$ax^2 + bx + c = 0$

$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, b^2 \geq 4ac$

من أجل جذور حقيقية.

2. اللوغاريتمات

$b^x = y , x = \log_b y$

اللوغاريتمات الطبيعية

$b = e = 2.718\ 282$

$e^x = y$, $x = \log_c y = \ln y$

$\log(ab) = \log a + \log b$

$\log(a/b) = \log a - \log b$

$\log(1/n) = -\log n$

$\log a^h = n \log a$

$\log 1 = 0$

$\log_{10} x = 0.4343 \ln x$

3. المُعيّنات

2 nd order

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} = a_1b_2 - a_2b_1$$

3rd order

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} = \begin{matrix} +a_1b_2c_3 + a_2b_3c_1 + a_3b_1c_2 \\ -a_3b_2c_1 - a_2b_1c_3 - a_1b_3c_2 \end{matrix}$$

4. المعادلة التكعيبية

$x^3 = A\,x + B$

ليكن:

$p = A/3$, $q = B/2$.

الحالة 1:

$q^2 - p^3$ سالب

(ثلاثة جذور حقيقية ومتمايزة)

$$\cos u = q/(p\sqrt{p}), 0 < u < 180^\circ$$
$$x_1 = 2\sqrt{p}\cos(u/3)$$
$$x_2 = 2\sqrt{p}\cos(u/3) + 120^\circ)$$
$$x_3 = 2\sqrt{p}\cos(u/3 + 240^\circ)$$

الحالة II:

$q^2 - p^3$ موجب

(جذر حقيقي واحد، وجذران تخيليان)

$$x_1 = \left(q + \sqrt{q^2 - p^3})\right)^{\frac{1}{3}} + \left(q - \sqrt{q^2 - p^3})^{1/3}\right)^{\frac{1}{3}}$$

الحالة III:

$$q^2 - p^3 = 0$$

(ثلاثة جذور حقيقية، جذران متساويان)

$$x_1 = 2q^{1/3}, x_2 = x_3 = -q^{1/3}$$

ومن أجل معادلة مكعبية في الحالة العامة:

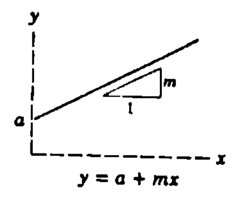
$$x^3 + a\,x^2 + b\,x + c = 0$$

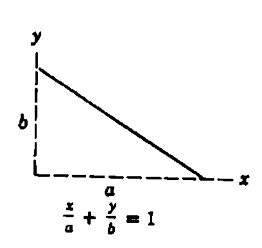
عوض: $x = x_0 - \frac{q}{3}$ واحصل على $x_0^3 = Ax_0 + B$.

ثم تابع العمل وفق ما ورد في الأعلى لتجد قيم x_0 والتي منها تجد $x = x_0 - \frac{q}{3}$.

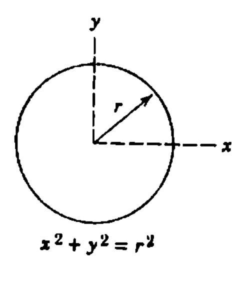
الهندسة التحليلية Analytic Geometry

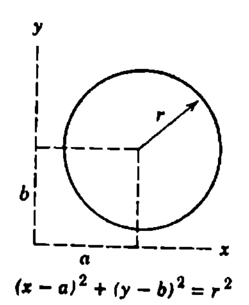
1. الخط المستقيم



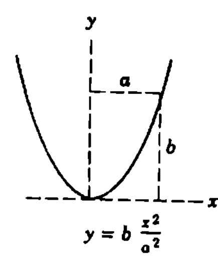


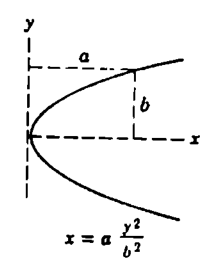
2. الدائرة



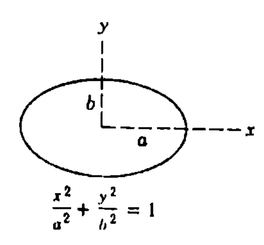


3. القطع المكافئ

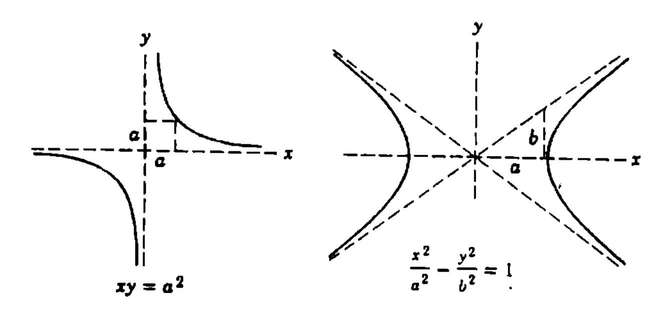




4. القطع الناقص



5. القطع الزائد



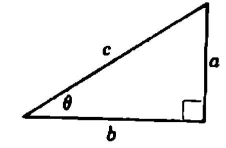
Trigonometry — علم المثلثات

1 . تعاريف

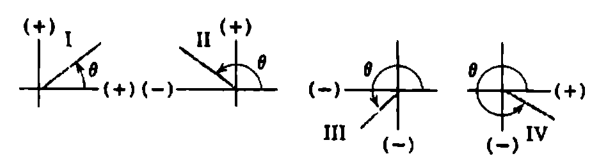
$\sin \theta = a/c \quad \csc \theta = c/a$

$\cos \theta = b/c \quad \sec \theta = c/b$

$\tan \theta = a/b \quad \cot \theta = b/a$



2. الإشارات في الأرباع الأربعة



	I	II	III	IV
$\sin\theta$	+	+	−	−
$\cos\theta$	+	−	−	+
$\tan\theta$	+	−	+	−
$\csc\theta$	+	+	−	−
$\sec\theta$	+	−	−	+
$\cot\theta$	+	−	+	

4. علاقات متفرّقة

$$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$$

$$1 + \tan^2\theta = \sec^2\theta$$

$$1 + \cot^2\theta = \csc^2\theta$$

$$\sin\frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{1}{2}(1-\cos\theta)}$$

$$\cos\frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{1}{2}(1+\cos\theta)}$$

$$\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$$

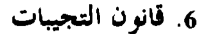
$$\cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta$$

$$\sin (a \pm b) = \sin a \cos b \pm \cos a \sin b$$

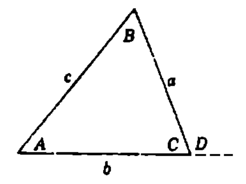
$$\cos (a \pm b) = \cos a \cos b \pm \sin a \sin b$$

5. قانون الجيوب

$$\frac{a}{b} = \frac{\sin A}{\sin B}$$



6. قانون التجيبات



$$c^2 = a^2 + b^2 - 2\,ab \cos C$$

$$c^2 = a^2 + b^2 + 2\,ab \cos D$$

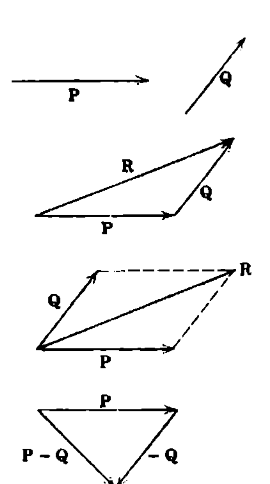
Vector Operations العمليات على المتجهات

1. **التنويت (الترميز المطبعي)**. تطبع المقادير المتجهية بنموذج الطباعة الغامق، أما المقادير السلمية فتظهر بنموذج الطباعة الدقيق. وهكذا يكون للمقدار المتجهي **V** القيمة السلمية V. ويجب أن توضَّح المقادير المتجهية أثناء المداولات الطويلة برمز مثل $\underline{V}$ أو $\vec{V}$ لتمييزها عن المقادير السلمية.

2. الجمع.

الجمع وفق قاعدة المثلث **P + Q = R**

الجمع وفق قاعدة متوازي الأضلاع **P + Q = R**

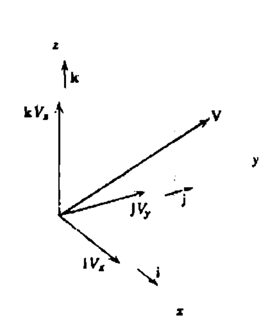


القانون التبديلي **P + Q = Q + P**

القانون التجميعي **P + (Q + R) = (P + Q) + R**

3. الطرح

P - Q = P + (- Q)



4. المتجهات الواحدية i، j، k

$$\mathbf{V} = V_x\,\mathbf{i} + V_y\,\mathbf{j} + V_z\,\mathbf{k}$$

حيث:

$$|\mathbf{V}| = V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

5. التجيبات الموجهة، l، m، n هي تجيبات الزوايا بين **V** والمحاور x، y، z. وعليه:

$$l = V_x/V \;؛\; m = V_y/V \;؛\; n = V_z/V$$

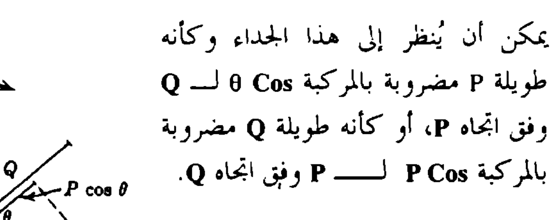
ولذا فإن: $\mathbf{V} = V\,(l\,\mathbf{i} + m\,\mathbf{j} + n\,\mathbf{k})$

و $l^2 + m^2 + n^2 = 1$

6. الجداء النقطي أو السـلمي



$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{Q} = P\,Q \cos\theta$$



يمكن أن يُنظر إلى هذا الجداء وكأنه طويلة P مضروبة بالمركبة **Cos θ** لـ **Q** وفق اتجاه **P**، أو كأنه طويلة **Q** مضروبة بالمركبة **P Cos** لـــ **P** وفق اتجاه **Q**.

القانون تبديلي $\mathbf{P} \cdot \mathbf{Q} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{P}$

ومن تعريف الجداء النقطي:

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{k} = 1$$

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{i} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{j} = 0$$

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{Q} = (P_x\,\mathbf{i} + P_y\,\mathbf{j} + P_z\,\mathbf{k}) \cdot (Q_x\,\mathbf{i} + Q_y\,\mathbf{j} + Q_z\,\mathbf{k})$$

$$= P_x Q_x + P_y Q_y + P_z Q_z$$

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{P} = P_x^2 + P_y^2 + P_z^2$$

وينتج من تعريف الجداء النقطي أنه يكون المتجهان **P** و**Q** متعامدين عندما ينعدم جداؤهما، $\mathbf{P} \cdot \mathbf{Q} = 0$.

ويمكن إيجاد الزاوية θ بين المتجهين $\mathbf{P_1}$ و$\mathbf{P_2}$ من عبارة جدائهما النقطي

$$\mathbf{P_1} \cdot \mathbf{P_2} = P_1 P_2 \cos\theta$$

التي تعطي:

$$\cos\theta = \frac{P_1 \cdot P_2}{P_1 P_2} = \frac{P_{1x} P_{2x} + P_{1y} P_{2y} + P_{1z} P_{2z}}{P_1 P_2} = l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2$$

حيث l، m، n تشير إلى التحيبات الموجهة المتتالية للمتجهات.

ويلاحظ أيضاً أن المتجهين يتعامدان عندما تحقق التجيبات الموجهة لهما العلاقة، $l_1l_2 + m_1m_2 + n_1n_2 = 0$.

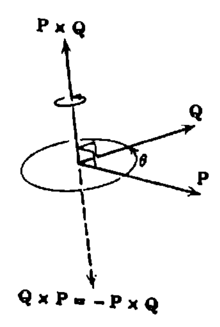
القانون توزيعي $P.(Q + R) = P \cdot Q + P \cdot R$

7. الجداء الاتجاهي أو المتصالب.



يُعرَّف الجداء الاتجاهي لمتجهين P وQ بالمتجه ذي الطويلة:

$$|P \times Q| = P\,Q\,\mathrm{Sin}\,\theta$$



والاتجاه مُميَّز بقاعدة اليد اليمنى وفق ما هو موضح بالشكل الجانبي.

وبعكس ترتيب المتجه وباستخدام قاعدة اليد اليمنى، يعطي:

$$Q \times P = -\,P \times Q$$

القانون توزيعي $P \times (Q + R) = P \times Q + P \times Q$

من تعريف الجداء الاتجاهي وباستخدام منظومة الإحداثيات اليمينية نحصل:

$$i \times j = k \qquad j \times k = i \qquad k \times i = j$$

$$-j \times i = -k \qquad k \times j = -i \qquad i \times k = -j$$

$$i \times i = j \times j = k \times k = 0$$

وبمساعدة هذه المتطابقات وقانون التوزيع، يمكن أن يكتب الجداء الاتجاهي وفق:

$$\mathbf{P} \times \mathbf{Q} = (P_x \mathbf{i} + P_y \mathbf{j} + P_z \mathbf{k}) \times (Q_x \mathbf{i} + Q_y \mathbf{j} + Q_z \mathbf{k})$$
$$= (P_y Q_z - P_z Q_y)\, \mathbf{i} + (P_z Q_x - P_x Q_z)\mathbf{j} + (P_x Q_y - P_y Q_x)\mathbf{k}$$

إن الجداء الاتجاهي يمكن أن يُعبَّر عنه أيضاً بالمعين:

$$P \times Q = \begin{vmatrix} i & j & k \\ P_x & P_y & P_z \\ Q_x & Q_y & Q_z \end{vmatrix}$$

8. علاقات إضافيّة

الجداء السلمي الثلاثي $(P \times Q) . R = R . (P \times Q)$

يمكن أن يتم التبادل بين النقطة وإشارة الضرب طالما ترتيب المتجهات محافظ عليه. ولا يكون هناك ضرورة للأقواس بما أن $P\times (Q . R)$ ليس له معنى لأن متجهاً P لا يمكن أن يُتبع بإشارة ضرب بالمقدار السلمي **Q . R**. وهكذا يمكن أن يكتب التعبير وفق:

$$\mathbf{P} \times \mathbf{Q} . \mathbf{R} = \mathbf{P} . \mathbf{Q} \times \mathbf{R}$$

وللجداء السلمي الثلاثي منشور المعينة:

$$\mathbf{P} \times \mathbf{Q} . \mathbf{R} \begin{vmatrix} P_x & P_y & P_z \\ Q_x & Q_y & Q_z \\ R_x & R_y & R_z \end{vmatrix}$$

الجداء الاتجاهي الثلاثي:

$$(\mathbf{P} \times \mathbf{Q}) \times \mathbf{R} = - \mathbf{R}\, (\mathbf{P} \times \mathbf{Q})$$
$$= \mathbf{R} \times (\mathbf{Q} \times \mathbf{P})$$

هنا لابد من استخدام الأقواس، إذ أن التعبير $\mathbf{P \times Q \times R}$ سيكون ملتبساً لأنه لا يُحدِّد المتجه الواجب إلحاقه بالضرب.

ومن الممكن أن يُبيَّن بأن الجداء الاتجاهي الثلاثي يكافئ:

$$\mathbf{(P \times Q) \times R = R \,.\, PQ - R.QP}$$

أو

$$\mathbf{P \times (Q \times R) = P \,.\, RQ - P \,.\, QR}$$

فالحد الأول في التعبير الأول مثلاً، هو الجداء النقطي $\mathrm{P \,.\, R}$ أو السلمي، مضروباً بالمتجه Q.

9. **مشتقات المتجهات**. وتخضع لنفس القوانين كما هو الحال بالنسبة للمقادير السلمية.

$$\frac{dp}{dt} = \dot{P} = \dot{P}_x i + \dot{P}_y j + \dot{P}_z k$$

$$\frac{d(Pu)}{dt} = \dot{P}u + \dot{P}u$$

$$\frac{d(P.Q)}{dt} = \dot{P}.Q + \dot{P}.Q$$

$$\frac{d(P \times Q)}{dt} = \dot{P} \times Q + \dot{P} \times Q$$

10. تكامل المتجهات

إذا كان $\mathbf{V}$ تابعاً لـــ x وy وz ولعنصر حجمي $d\tau$ يساوي إلى $d\tau = d_x\, d_y\, d_z$، فإن تكامل $\mathbf{V}$ على الحجم يمكن أن يُكتب كمجموع متجهي للتكاملات الثلاثة لمركباته، وعليه:

$$\int V\, d\tau = i \int V_x\, d\tau + j \int V_y\, d\tau + k \int V_z\, d\tau$$

Series السلاسل

(التعبير في الأقواس المربعة الذي يلي السلاسل يُبيِّن مجال التقارب)

$$(1\pm x)^n = 1 \pm nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 \pm \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}x^3 + \ldots [x^2 < 1]$$

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \ldots \qquad [x^2 < \infty]$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \ldots \qquad [x^2 < \infty]$$

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \frac{x^7}{7!} + \ldots \qquad [x^2 < \infty]$$

$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} = 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \frac{x^6}{6!} + \ldots \qquad [x^2 < \infty]$$

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\frac{n\pi x}{l} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\frac{n\pi x}{l}$$

$$\text{where } a_n = \frac{1}{l}\int_{-l}^{l} f(x)\cos\frac{n\pi x}{l}\,dx,\ b_n = \frac{1}{l}\int_{-l}^{l} f(x)\sin\frac{n\pi x}{l}\,dx$$

[Fourirer exp ansion for $-l < x < l$]

Derivatives المشتقات

$$\frac{dx^n}{dx} = nx^{n-1}, \quad \frac{d(uv)}{dx} = u\frac{dv}{dx} + v\frac{du}{dx}, \quad \frac{d\left(\frac{u}{v}\right)}{dx} = \frac{v\frac{du}{dx} - u\frac{dv}{dx}}{v^2}$$

$$\lim_{\Delta x \to 0} \sin \Delta x = \sin dx = \tan dx = dx$$

$$\lim_{\Delta x \to 0} \cos \Delta x = \cos dx = 1$$

$$\frac{d \sin x}{dx} = \cos x, \frac{d \cos x}{dx} = -\sin x, \frac{d \tan x}{dx} = \sec^2 x$$

$$\frac{d \sinh x}{dx} = \cosh x, \frac{d \cosh x}{dx} = \sinh x, \frac{d \tanh x}{dx} = \operatorname{sech}^2 x$$

Integrals التكاملات الشهيرة

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1}$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln x$$

$$\int \sqrt{a+bx}\,dx = \frac{2}{3b}\sqrt{(a+bx)^3}$$

$$\int x\sqrt{a+bx}\,dx = \frac{2}{15b^2}(3bx-2a)\sqrt{(a+bx)^3}$$

$$\int x^2\sqrt{a+bx}\,dx = \frac{2}{105b^2}(8a^2-12ab^2x^2)\sqrt{(a+bx)^3}$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a+bx}} = \frac{2\sqrt{a+bx}}{b}$$

$$\int \frac{\sqrt{a+x}}{\sqrt{a-x}}dx = -\sqrt{a+x}\sqrt{b-x} + (a+b)\sin^{-1}\sqrt{\frac{a+x}{a-b}}$$

$$\int \frac{x\,dx}{a+bx} = \frac{1}{b^2}[a+bx-a\ln(a+bx)]$$

$$\int \frac{x\,dx}{(a+bx)^n} = \frac{(a+bx)^{1-n}}{b^2}\left(\frac{a+bx}{2-n}-\frac{a}{1-n}\right)$$

$$\int \frac{x\,dx}{a+bx^2} = \frac{1}{\sqrt{ab}}\tan^{-1}\frac{x\sqrt{ab}}{a} \quad \text{or} \quad \frac{1}{\sqrt{-ab}}\tanh^{-1}\frac{x\sqrt{-ab}}{a}$$

$$\int \frac{x\,dx}{a+bx^2} = \frac{1}{2b}\ln(a+bx^2)$$

$$\int \sqrt{x^2 \pm a^2}\,dx = \frac{1}{2}[x\sqrt{x^2 \pm a^2} \pm a^2\ln(x+\sqrt{x^2 \pm a^2})]$$

$$\int \sqrt{a^2-x^2}\,dx = \frac{1}{2}\left(x\sqrt{a^2-x^2} + a^2\sin^{-1}\frac{x}{a}\right)$$

$$\int x\sqrt{a^2-x^2}\,dx = -\frac{1}{3}\sqrt{(a^2-x^2)^3}$$

$$\int x^2\sqrt{a^2-x^2}\,dx = -\tfrac{x}{4}\sqrt{(a^2-x^2)^3}+\frac{a^2}{8}\left(x\sqrt{a^2-x^2}+a^2\sin^{-1}\frac{x}{a}\right)$$

$$\int x^3\sqrt{a^2-x^2}\,dx = -\tfrac{1}{5}(x^2+\tfrac{2}{3}a^2)\sqrt{(a^2-x^2)^3}$$

$$\int\frac{dx}{\sqrt{a+bx+cx^2}}=\frac{1}{\sqrt{c}}\ln\left(\sqrt{a+bx+cx^2}+x\sqrt{c}\frac{b}{2\sqrt{c}}\right) \quad \text{or} \quad \frac{-1}{\sqrt{-c}}\sin^{-1}\left(\frac{b+2cx}{\sqrt{b^2-4ac}}\right)$$

$$\int\frac{dx}{\sqrt{x^2\pm a^2}}=\ln(x+\sqrt{x^2\pm a^2})$$

$$\int\frac{dx}{\sqrt{a^2-x^2}}=\sin^{-1}\frac{x}{a}$$

$$\int\frac{x\,dx}{\sqrt{x^2-a^2}}=\sqrt{x^2-a^2}$$

$$\int\frac{x\,dx}{\sqrt{a^2\pm x^2}}=\pm\sqrt{a^2\pm x^2}$$

$$\int x\sqrt{x^2\pm a^2}\,dx=\tfrac{1}{3}\sqrt{(x^2\pm a^2)^3}$$

$$\int x^2\sqrt{x^2\pm a^2}\,dx=\frac{x}{4}\sqrt{(x^2\pm a^2)^3}\pm\frac{a^2}{8}x\sqrt{x^2\pm a^2}-\frac{a^4}{8}\ln(x+\sqrt{x^2\pm a^2})$$

$$\int\sin x\,dx=-\cos x$$

$$\int\cos x\,dx=\sin x$$

$$\int\sec x\,dx=\frac{1}{2}\ln\frac{1+\sin x}{1-\sin x}$$

$$\int\sin^2 x\,dx=\frac{x}{2}-\frac{\sin 2x}{4}$$

$$\int\cos^2 x\,dx=\frac{x}{2}+\frac{\sin 2x}{4}$$

$$\int\sin x\cos x\,dx=\frac{\sin^2 x}{2}$$

$$\int \sinh x \, dx = \cosh x$$

$$\int \cosh x \, dx = \sinh x$$

$$\int \tanh x \, dx = \ln \cosh x$$

$$\int \ln x \, dx = x \ln x - x$$

$$\int e^{ax} \, dx = \frac{e^{ax}}{a}$$

$$\int x e^{ax} \, dx = \frac{e^{ax}}{a^2}(ax - 1)$$

$$\int e^{ax} \sin px \, dx = \frac{e^{ax}(a \sin px - p \cos px)}{a^2 + p^2}$$

$$\int e^{ax} \sin^2 x \, dx = \frac{e^{ax}}{4 + a^2}\left(a \sin^2 x - \sin 2x + \frac{2}{a}\right)$$

$$\int e^{ax} \cos^2 x \, dx = \frac{e^{ax}}{4 + a^2}\left(a \cos^2 x + \sin 2x + \frac{2}{a}\right)$$

$$\int e^{ax} \sin^2 x \cos x dx = \frac{e^{ax}}{4 + a^2}(a \sin 2x - \cos 2x)$$

$$\int \sin^3 x \, dx = -\frac{\cos x}{3}(2 + \sin^2 x)$$

$$\int \cos^3 x \, dx = \frac{\sin x}{3}(2 + \cos^2 x)$$

$$\int \cos^5 x \, dx = \sin x - \tfrac{2}{3}\sin^3 x + \tfrac{1}{5}\sin^5 x$$

$$\int x \sin x \, dx = \sin x - x \cos x$$

$$\int x \cos x \, dx = \cos x + x \sin x$$

$$\int x^2 \sin x \, dx = 2x \sin x - (x^2 - 2)\cos x$$

$$\int x^2 \cos x \, dx = 2x \cos x + (x^2 - 2)\sin x$$

نصف قطر الانحناء

$$\rho_{xy} = \frac{\left[1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}{\frac{d^2y}{dx^2}}$$

$$\upsilon_{r\theta} = \frac{\left[r^2+\left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2\right]^{3/2}}{r^2+2\left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 - r\frac{d^2r}{d\theta^2}}$$

جدول المحتويات

4 الصيغ الخاصة بالأوتاد وعموم أنواع الأوتاد الأرضية 137

5 صيغ البيتون 159

6 الصيغ الخاصة بهندسة المنشآت الخشبية 233

8 الصيغ الخاصة بالتربة والأعمال الترابية 283

9 صيغ تصميم عناصر الأبنية والمنشآت العامة 311

10 صيغ الجسور وأكبال التعليق........................355

11 صيغ الطرقات والطرقات العامة (السريعة)............397

12 صيغ علم الهيدروليك والمنشآت المائية..................423

The Portable Civil Engineering Formulas Reference

مرجعك السريع والمفيد في المواضيع التالية:

- عوامل التحويل الخاصة بتطبيقات الهندسة المدنية
- الصيغ الخاصة بالجيزان
- صيغ الأعمدة
- الصيغ الخاصة بالأوتاد وعموم أنواع الأوتاد الأرضية
- صيغ البيتون
- الصيغ الخاصة بهندسة المنشآت الخشبية
- صيغ علم المساحة التطبيقية
- الصيغ الخاصة بالتربة والأعمال الترابية
- صيغ تصميم عناصر الأبنية والمنشآت العامة
- صيغ الجسور وأكبال التعليق
- صيغ الطرقات والطرقات العامة (السريعة)
- صيغ علم الهيدروليك والمنشآت المائية
- جداول مفيدة
- مواضيع منتقاة من العلوم الرياضية



http://www.raypub.com

